

TESIS DE MÁSTER

Máster

Máster en Ingeniería Civil

Título

**Estudio de hormigones de altas prestaciones
fabricados con áridos reciclados
706-TFM-462**

Autor

Julio Bonet Magdalena

Tutor

Miren Etxeberria Larrañaga

Intensificación

Ingeniería Medioambiental y Sostenibilidad

Fecha

28 de Junio de 2013

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi agradecimiento a Miren, por haberse prestado a guiarme y aconsejarme en esta aventura.

A Desiree y a Andreu, por haber sido mis compañeros y haberme echado un cable cuando lo necesitaba.

A Eufronio, Sergi, Karmele, Gustavo, Cristián, Diego.... Y a toda la gente del laboratorio que ha hecho que las horas pasaran más cómodamente.

Y, sobre todo, a Sara. Ella ya sabe por qué.

Índice

| | |
|--|----|
| Índice de tablas | 6 |
| Índice de figuras | 7 |
| RESUMEN | 10 |
| ABSTRACT | 11 |
| 1. Introducción | |
| 1.1 Metodología de estudio | 12 |
| 1.2 Objetivos | 12 |
| 2. Estado del arte | |
| 2.1 Definición de árido reciclado | 14 |
| 2.2 Tipos de árido reciclado | 15 |
| 2.2.1 Árido reciclado de hormigón | 15 |
| 2.2.2 Árido reciclado cerámico | 15 |
| 2.2.3 Árido reciclado mixto | 15 |
| 2.3 Obtención de los áridos reciclados | 15 |
| 2.3.1 Trituración de los RCD | 15 |
| 2.4 Propiedades de los áridos reciclados aplicados a la fabricación del hormigón | 16 |
| 2.4.1 Granulometría | 17 |
| 2.4.1.1 Contenido de finos <0.063mm | 17 |
| 2.4.2 Mortero adherido | 17 |
| 2.4.3 Densidad y capacidad de absorción | 17 |
| 2.4.4 Coeficiente de forma | 18 |
| 2.4.5 Coeficiente de los Angeles | 18 |
| 2.4.6 Contaminantes e impurezas | 19 |
| 2.5 Diseño de la mezcla de un hormigón con árido reciclado | 20 |
| 2.6 Propiedades físicas del hormigón reciclado | 21 |
| 2.6.1 Densidad | 21 |
| 2.7 Propiedades mecánicas del hormigón reciclado | 21 |
| 2.7.1 Resistencia a la compresión del hormigón reciclado | 21 |

| | |
|---|-----------|
| 2.7.2 Resistencia a la tracción del hormigón reciclado | 23 |
| 2.7.3 Modulo elástico del hormigón reciclado | 24 |
| 2.8 Durabilidad del hormigón | 25 |
| 2.8.1 Características físicas | 25 |
| 2.8.1.1 Porosidad | 25 |
| 2.8.1.2 Permeabilidad | 26 |
| 2.8.2 Durabilidad. Procesos físicos..... | 28 |
| 2.8.2.1 Resistencia del hormigón reciclado a altas temperaturas.... | 28 |
| 2.8.2.2 Resistencia, ciclos hielo-deshielo..... | 28 |
| 2.8.2.3 Fluencia y retracción..... | 29 |
| 2.8.3 Durabilidad. Procesos químicos | 30 |
| 2.8.3.1 Corrosión del acero dentro del hormigón | 30 |
| 2.8.3.2 ataque por cloruros en los hormigones reciclados..... | 31 |
| 2.8.3.3 Carbonatación..... | 32 |
| 2.9 Hormigón de alta resistencia con árido reciclado | 33 |
| 2.9.1 Dosificaciones y materiales..... | 34 |
| 2.9.2 Propiedades del hormigón fresco | 34 |
| 2.9.3 Propiedades mecánicas..... | 34 |
| 2.9.3.1 Resistencia a compresión..... | 35 |
| 2.9.3.2 Resistencia a tracción y modulo elástico | 35 |
| 2.9.3.3 Retracción y fluencia..... | 36 |
| 2.9.3.4 Adherencia | 36 |
| 2.9.4 Propiedades de durabilidad | 36 |
| 2.10 Curado del hormigón..... | 37 |
| 2.10.1 Curado al vapor | 37 |
| 2.10.1.1 Hormigón convencional | 38 |
| 2.10.1.2 Hormigones reciclados..... | 38 |
| 2.11 Adiciones de cenizas volantes..... | 41 |
| 2.11.1 Cenizas volantes y curado al vapor | 42 |

| | |
|--|----|
| 2.11.2 Cenizas volantes y hormigones reciclados..... | 43 |
| 3. Materiales | |
| 3.1 Introducción..... | 45 |
| 3.2 Caracterización de los materiales | 45 |
| 3.2.1 Cemento | 46 |
| 3.2.2 Áridos | 46 |
| 3.2.2.1 Granulometría de los áridos naturales y de los áridos reciclables | 47 |
| 3.2.2.2 Densidad de las partículas, absorción del agua | 49 |
| 3.2.2.3 Coeficiente de los Angeles | 50 |
| 3.2.2.4 Índice de lajas..... | 50 |
| 3.2.3 Cenizas volantes | 51 |
| 3.2.4 Aditivo | 51 |
| 4. Metodología y ensayos del hormigón | |
| 4.1 Proceso de fabricación del hormigón | 52 |
| 4.1.1 Fabricación | 52 |
| 4.1.2 Dosificación utilizada..... | 52 |
| 4.1.2.1 Fase 1: Hormigón con y sin cenizas volantes y curado en la cámara húmeda | 54 |
| 4.1.2.2 Fase 2: Hormigón con y sin cenizas volantes y curado en la cámara de vapor..... | 55 |
| 4.1.3 Probetas, densidad y compactación del hormigón fresco..... | 55 |
| 4.1.4 Desmolde y marcaje de la probeta | 56 |
| 4.1.5 Curado en cámara de vapor | 56 |
| 4.2 Ensayos del hormigón | 57 |
| 4.2.1 Ensayos mecánicos..... | 57 |
| 4.2.1.1 Ensayo de compresión | 57 |
| 4.2.1.2 Ensayo de tracción indirecta | 57 |
| 4.2.1.3 Modulo de elasticidad..... | 58 |
| 4.2.2 Ensayos físicos..... | 59 |

| | |
|---|-----|
| 4.2.2.1 Ensayos de densidad, absorción y poros accesibles | 59 |
| 4.2.2.2 Ensayo UPV (Ultrasonic Pulse Velocity) | 59 |
| 4.2.3 Durabilidad | 61 |
| 4.2.3.1 Ensayo de succión capilar | 61 |
| 4.2.3.2 Ensayo de penetración por cloruros | 62 |
| 4.2.3.3 Ensayo MIP (Mercury Intrusion Porosimetry) | 64 |
| 4.2.3.4 Ensayo de resistividad eléctrica | 64 |
| 5. Resultados | |
| 5.1 Propiedades mecánicas | 66 |
| 5.1.1 Resistencia a compresión simple | 66 |
| 5.1.1.1 Fase 1 | 66 |
| 5.1.1.2 Fase 2 | 72 |
| 5.1.1.3 Comparativa entre Fase1 y Fase 2 | 78 |
| 5.1.2 Resistencia a tracción indirecta | 83 |
| 5.1.3 Modulo de elasticidad..... | 85 |
| 5.2 Propiedades físicas | 87 |
| 5.2.1 Resultados densidad, absorción y poros accesibles | 87 |
| 5.2.2 Resultados UPV (Ultrasonic Pulse Velocity) | 89 |
| 5.3 Durabilidad | 91 |
| 5.3.1 Resultados ensayo succión capilar | 91 |
| 5.3.2 Resistencia a la penetración iones cloruros..... | 93 |
| 5.3.4 Análisis MIP (Mercury Intrusion Porosimetry)..... | 94 |
| 5.3.5 Resistividad eléctrica..... | 98 |
| 6. Conclusiones | |
| 6.1 Conclusiones | 100 |
| 6.1.1 Propiedades mecánicas hormigón endurecido | 100 |
| 6.1.2 Propiedades físicas hormigón endurecido | 101 |
| 6.1.3 Durabilidad del hormigón endurecido | 101 |
| 6.1.4 Conclusiones finales | 102 |

| | |
|--|------------|
| 6.2 Futuras líneas de investigación | 103 |
| 7. Bibliografía | |
| 7.1 Bibliografía | 104 |

Índice de tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1: Combinación de trituración primaria y secundaria..... | 16 |
| Tabla 2: Normativa UNE EN 933-11:2010 | 19 |
| Tabla 3: Composición química del cemento | 46 |
| Tabla 4: Propiedades del cemento | 46 |
| Tabla 5: Composición química de la ceniza volante | 49 |
| Tabla 6: Densidades | 50 |
| Tabla 7: Coeficiente de los Angeles | 51 |
| Tabla 8: Índice de lajas..... | 51 |
| Tabla 9: Nomenclatura de los hormigones..... | 53 |
| Tabla 10: Dosificación Fase 1 | 54 |
| Tabla 11: Velocidad del UPV | 60 |
| Tabla 12: Índice de penetración..... | 63 |
| Tabla 13: Valores de la resistividad..... | 65 |
| Tabla 14: Resultados resistencia a compresión Fase 1, (%) crecimiento de la resistencia de 24 horas a 7 días, de 24 horas a 28 días y de 28 días a 90 días | 66 |
| Tabla 15: Resultados resistencia compresión Fase 2, (%) crecimiento de la resistencia de 24 horas a 7 días, de 24 horas a 28 días y de 28 días a 90 días | 72 |
| Tabla 16: Resultados tracción indirecta..... | 83 |
| Tabla 17: Resultados Modulo de elasticidad | 85 |
| Tabla 18: Resultados densidad | 87 |
| Tabla 19: Resultados UPV | 89 |
| Tabla 20: Coeficiente de succión capilar..... | 92 |
| Tabla 21: Resultados carga eléctrica según la topología del hormigón..... | 93 |
| Tabla 22: Resultados del MIP según la topología del hormigón..... | 95 |
| Tabla 23: Resultados de resistividad eléctrica | 95 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1: Composición de los RCD [1] | 14 |
| Figura 2: Evolución de la resistencia a compresión de 7-28 días, con la sustitución de áridos reciclados | 22 |
| Figura 3: Rotura a tracción de una sección de hormigón reciclado [14] | 23 |
| Figura 4: Resistencia a tracción [16] | 23 |
| Figura 5: Medida de los poros a los 28 días según el tipo de hormigón [21] | 25 |
| Figura 6: Medida de los poros a los 5 años según el tipo de hormigón [21] | 26 |
| Figura 7: Permeabilidad según % del árido reciclado substituido [24]..... | 26 |
| Figura 8: Permeabilidad al paso del oxígeno [25]..... | 27 |
| Figura 9: Retracción a los 120 días de curado, hormigón reciclado y hormigón reciclado con adición de cenizas volantes [32]. | 30 |
| Figura 10: Conductividad (paso de los iones cloruros) [2]..... | 31 |
| Figura 11: Evolución de la carbonatación, 100% RCA | 33 |
| Figura 12: Relación entre resistencia a compresión y relación a/c para sustituciones de 0.30 y 100% [38] | 35 |
| Figura 13: Relación entre el factor de durabilidad por hielo-deshielo respecto al porcentaje de sustitución [38]..... | 37 |
| Figura 14: Resistencia a compresión a 1 día | 39 |
| Figura 15: Resistencia a compresión a 7 días | 39 |
| Figura 16: Resistencia a compresión a 28 días | 39 |
| Figura 17: SEM | 40 |
| Figura 18: Relación entre índice de poros y resistencia a compresión..... | 41 |
| Figura 19: Resistencia a compresión de hormigón con un tanto por ciento de sustitución de áridos reciclados..... | 43 |
| Figura 20: Resistencia a la penetrabilidad del ion cloruro a lo largo del tiempo con diferentes proporciones de cenizas volante..... | 44 |
| Figura 21: Granulometría de las gravas naturales | 47 |
| Figura 22: Granulometría arena natural | 48 |
| Figura 23: Granulometría de los áridos reciclados | 48 |

| | |
|---|----|
| Figura 24: Primer ciclo de mezcla | 52 |
| Figura 25: Curva teórica de Fuller | 53 |
| Figura 26: Curado de las probetas en la cámara húmeda | 56 |
| Figura 27: Distribución de temperatura durante el curado a vapor..... | 56 |
| Figura 28: Prensa para romper las probetas..... | 57 |
| Figura 29: Calibración del aparato UPV | 60 |
| Figura 30: Medidor UPV | 60 |
| Figura 31: Esquema del ensayo..... | 61 |
| Figura 32: Probetas sobre lámina de agua..... | 62 |
| Figura 33: Impermeabilización de las probetas para el ensayo de penetración de cloruros | 62 |
| Figura 34: Extracción del aire de los poros sumergiendo la probeta al vacío | 62 |
| Figura 35: Llenado de depósitos con NaOH y NaCl..... | 63 |
| Figura 36: Ensayo de penetración de cloruros..... | 63 |
| Figura 37: Ensayo de resistividad eléctrica | 65 |
| Figura 38: Resistencia a compresión a 24 horas del hormigón sin ceniza y curado en la cámara húmeda | 67 |
| Figura 39: Resistencia a compresión a 24 horas del hormigón con ceniza y curado en la cámara húmeda | 68 |
| Figura 40: Resistencia a compresión a 28 días del hormigón sin ceniza y curado en la cámara húmeda | 69 |
| Figura 41: Resistencia a compresión a 28 días del hormigón con ceniza y curado en la cámara húmeda | 70 |
| Figura 42: Resistencia a compresión a 90 días del hormigón con ceniza y sin ceniza curado en la cámara húmeda | 71 |
| Figura 43: Resistencia a compresión a 24 horas el hormigón sin ceniza y curado en la cámara de vapor | 73 |
| Figura 44: Resistencia a compresión a 24 horas del hormigón con ceniza y curado en la cámara de vapor | 74 |
| Figura 45: Resistencia a compresión a 28 días del hormigón sin ceniza y curado en la cámara de vapor | 75 |
| Figura 46: Resistencia a compresión a 28 días del hormigón con ceniza y curado en la cámara de vapor | 76 |
| Figura 47: Resistencia a compresión a 90 días del hormigón con ceniza y sin ceniza curado en la cámara de vapor..... | 76 |

| | |
|---|----|
| Figura 48: Comparativa de resistencias en % respecto a 28 días de curado entre hormigones sin cenizas (SC) y hormigones sin cenizas con curado al vapor (SC-V) | 78 |
| Figura 49: Comparativa de resistencias en % respecto a 90 días de curado entre hormigones sin cenizas (SC) y hormigones sin cenizas con curado al vapor (SC-V) | 79 |
| Figura 50: Comparativa de resistencias en % respecto a 28 días de curado entre hormigones sin cenizas (CC) y hormigones sin cenizas con curado al vapor (CC-V) | 79 |
| Figura 51 Comparativa de resistencias en % respecto a 90 días de curado entre hormigones sin cenizas (CC) y hormigones sin cenizas con curado al vapor (CC-V) | 80 |
| Figura 52 Comparativa de resistencias en % respecto a 90 días de curado entre hormigones sin cenizas (SC) y hormigones sin cenizas con curado al vapor (CC-V)..... | 81 |
| Figura 53 Comparativa de resistencias de los hormigones CC-V a diferentes edades en % respecto al hormigón SC | 81 |
| Figura 54: Resultados a tracción indirecta en la Fase 1 y 2 | 84 |
| Figura 55: Resultados módulo de elasticidad de la Fase 1 y 2..... | 86 |
| Figura 56: Resultados volumen de poros..... | 88 |
| Figura 57: Resultados UPV | 90 |
| Figura 58: Evolución de la absorción del agua por los hormigones..... | 91 |
| Figura 59: Resultados carga eléctrica | 94 |
| Figura 60: Diagrama de MIP para HC..... | 95 |
| Figura 61: Diagrama de MIP para HR..... | 96 |
| Figura 62: Comparativa entre HC y HR (SC-CC-V) | 97 |
| Figura 63: Resultados resistividad eléctrica..... | 99 |

RESUMEN

TITULO: Estudio de hormigones de altas prestaciones fabricados con áridos reciclados

AUTORA: Julio Bonet Magdalena

TUTORA: Miren Etxeberria Larrañaga

El presente documento pretende analizar el comportamiento de los hormigones con áridos reciclados y con un porcentaje de sustitución de cenizas volantes sometidos a dos tipos diferentes de curado: El curado convencional en cámara húmeda y el curado en cámara de vapor. Se trata de establecer las relaciones entre los dos tipos de curado y ver los efectos causados en las propiedades físicas, mecánicas y en la durabilidad de dichos hormigones.

El propósito de este estudio es demostrar los efectos beneficiosos que puede tener el curado en cámara de vapor sobre hormigones con una baja relación agua/cemento como es el caso de los hormigones con áridos reciclados.

Los residuos utilizados para la elaboración de los áridos reciclados tienen resistencias de 40 MPa, 60 MPa y 100 MPa. La fabricación del hormigón reciclado se ha hecho con la sustitución del 50% y del 100% de árido reciclado. Como ya se ha comentado anteriormente también se han añadido cenizas volantes, dado que ciertos estudios observan una mejora de los hormigones con esta incorporación. También se ha ensayado con el hormigón convencional con tal de establecer comparativas fehacientes.

El procedimiento que ha guiado los experimentos ha sido el siguiente: Se ha determinado la dosificación conveniente del hormigón convencional y, a partir de esta, la relación agua/cemento efectiva para todas las fabricaciones con árido reciclado. Esta relación se refiere a la cantidad de agua que se considera que reacciona con el cemento y que no es absorbida por los áridos. Tras determinar las dosificaciones se ha procedido a la fabricación de las diferentes probetas. La fabricación, a su vez, ha sido dividida en dos fases: fabricación de probetas curadas en la cámara húmeda (fase I) y, posteriormente, fabricación de probetas curadas en cámara de vapor (fase II). Una vez fabricadas cada una de las fases se han ido realizando experimentos con las probetas a diferentes edades (24h, 7d, 28d y 90d).

En las dos fases se estudiaron las propiedades del hormigón endurecido. Se determinaron las propiedades mecánicas (compresión, tracción indirecta y módulo de elasticidad), físicas (densidad, absorción y volumen de poros y UPV), y de durabilidad (succión capilar, penetración por cloruros, porosimetría por intrusión de mercurio y resistividad eléctrica).

Realizados los análisis de las propiedades de los hormigones se puede concluir, entre otras observaciones, que a las 24 horas los hormigones curados en la cámara de vapor obtienen una resistencia mayor que los hormigones curados en la cámara húmeda; pero llegados los 90 días de curado la resistencia de los hormigones curados en la cámara de vapor muestra una evolución inferior no llegando a alcanzar las resistencias de los hormigones curados en la cámara húmeda. Los hormigones con áridos reciclados de alta calidad pueden ser sustituidos hasta un 100%, manteniendo las propiedades del hormigón de altas prestaciones. El uso de cenizas es viable siempre que se utilice el curado al vapor. Los hormigones con áridos reciclados alcanzan resultados superiores al hormigón convencional cuando se usa este curado en áridos de más de 60MPa.

ABSTRACT

TITLE: Study of high performance concrete made with recycled aggregates

AUTHOR: Julio Bonet Magdalena

TUTOR: Miren Etxeberria Larrañaga

The present document will proceed to analyse the behaviour of concrete containing recycled aggregates with a substitution percentage of fly ash subject to two types of curing: Conventional curing in a wet chamber and curing in a steam chamber. The study will establish a comparison between the two types of curing and will show the derived effects on their physical and mechanical properties and in the durability of the analysed concretes.

The aim of the present study is to demonstrate the beneficial effects that can have the steam curing process of the concretes with a low water/cement ratio as it is the case of the recycled aggregates concretes.

The residues used in the preparation of the recycled aggregates have resistances of 40 MPa, 60 MPa and 100 MPa. The fabrication of the recycled concrete has been made by means of a substitution of a 50% and a 100% of recycled aggregates. As mentioned before, fly ash has also been added, due to the improvement of the concretes presented by different studies. Conventional concrete has also been studied as a control for the comparison with the prepared recycled concretes.

The proceedings in the experiments are as continues: The appropriate dosage for the conventional concrete has been determined, and from it, the correct water/cement ratio for all the recycled aggregates production. The mentioned ratio refers to the quantity of water that reacts with the cement and it is not absorbed by the aggregates. After the dosage determination the test sample have been manufactured. The manufacture of the different test sample has been divided in two phases: The manufacture of the test samples cured in the wet chamber (Phase I) and next, the manufacture of the test samples cured in the steam chamber (Phase II). Once all the test samples have been produced, they have been subject of different experiments at different times (24h, 7d, 28d and 90d).

In both phases the properties of the hardened concrete have been studied. The mechanical properties by means of compression, tensile strength and modulus of elasticity assays; the physical properties determined by density, absorption and volume of the pores and UPV assays; and the durability by means of capillary suction, chloride penetration, mercury porosimetry and electric resistivity assays.

Once performed the analysis of the properties of concrete it can be concluded that, among other observations, at 24 hours the concretes cured in steam chamber gains more strength than the ones cured in the wet chamber; but after 90 days the resistance of the concrete cured in the steam chamber shows lower evolution that not reaches the resistance of the concretes cured in the humidity chamber. Concretes with a high quality recycled aggregates can be replaced up to 100% while maintaining the properties of high performance concretes. The use of fly ashes is viable when the steam curing is used. Recycled aggregate concretes achieve better results than the conventional concrete when this kind of curing is used on 60MPa or higher aggregates.

1.- Introducció

El hormigón es uno de los principales materiales utilizados en la construcción, el hecho de ser un material tan utilizado hace que cada vez se generen más residuos tanto en la construcción como en la demolición de las estructuras de hormigón. La solución con más fuerza es la utilización de árido reciclado, en sustitución al árido natural. De esta manera, se soluciona el problema que genera los residuos de la construcción y a la vez se deja de extraer materia prima.

Es prioritario optimizar la fabricación de hormigones con áridos reciclados por varios motivos. La ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados determina que antes de 2020, la cantidad de residuos no peligrosos de construcción y demolición destinados a la preparación para la reutilización deberá alcanzar como mínimo el 70% en peso de los producidos.

Debido a la falta de estudios y la desconfianza que el uso de dichos materiales provoca sobre las propiedades del hormigón con árido reciclado, su uso se restringe a usos que no reclaman una elevada resistencia, motivo por el cual nace nuestro estudio con la finalidad de llevar a cabo investigaciones para poder caracterizarla, utilizando diferentes tipos de curados .

1.1.- Metodología de estudio

El primer paso que se debe hacer en todo estudio científico es la búsqueda de información de los trabajos relacionados con el tema que se quiere estudiar. Se consultaron monografías, estudios y artículos presentados en revistas científicas de orden internacional. También las normas de los ensayos a que se sometieron las probetas.

Este estudio se centra en las diferentes aplicaciones de los áridos reciclados en hormigones no estructurales. Para ello se han fabricado hormigones con diferentes contenidos de árido reciclado y con adicción de cenizas volantes. También utilizando diferentes tipos de curados, unos en la cámara húmeda y otros en la cámara de vapor.

Antes de la fabricación de los hormigones se realizaron los trabajos experimentales de caracterización física y química de todos los áridos reciclados que se utilizaron siguiendo las normas correspondientes. Seguidamente se calcularon las dosificaciones de los hormigones empleando un criterio de máxima compacidad.

Una vez fabricados y curados los hormigones en el tiempo que marcan las normas de ensayo, se determinaron las propiedades mecánicas, físicas y de durabilidad.

1.2.- Objetivos

El objetivo de este trabajo es analizar la influencia que tiene la sustitución de árido natural por árido de hormigón reciclado en las propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad del hormigón tanto curados en la cámara húmeda como curados al vapor, con el fin que puede ser usado en aplicaciones de hormigones de alta resistencia.

La intención del estudio es obtener los siguientes objetivos específicos:

- Validar la calidad de los áridos reciclados para poderlos utilizar en la fabricación de los hormigones.
- Cuantificar el porcentaje máximo de sustitución de árido natural por el árido reciclado para que los hormigones resultantes puedan ser comparables al hormigón convencional.
- Determinar la influencia de la variación de la cantidad de árido substituido y el tipo de curado utilizado.
- Comparar los resultados de los hormigones curados en la cámara húmeda con respecto a los hormigones curados en la cámara de vapor.
- Comparar las propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad de los hormigones con árido reciclado con respecto al hormigón convencional, considerando el tipo de curado.

2.-Estado del arte

A lo largo de las últimas décadas se han empleado áridos reciclados en la fabricación del hormigón debido a la necesidad de reutilización de los materiales y también debido al impacto medioambiental que produce la extracción de los áridos sobre el medio. La investigación del uso de los RCD se ha centrado en obtener un hormigón estructural que cumpla los requisitos exigidos por la normativa y, cada vez más, se estudian los usos de los hormigones reciclados, así como las ventajas y los inconvenientes que comporta dicho uso.

2.1.- Definición de árido reciclado

El árido reciclado se entiende que es la materia que proviene de los materiales inorgánicos utilizados previamente en la construcción.

La materia prima está formada por los materiales pétreos generados como residuo durante el proceso de la construcción y demolición. Estos residuos obtenidos se pueden clasificar en las siguientes categorías dependiendo de su origen:

- Procedentes de la demolición parcial o total de edificios e infraestructuras.
- Procedentes de la construcción de edificios e infraestructuras.
- Procedentes de obras de rehabilitación, reforma y ampliación de edificios e infraestructuras.

Debido a las diferentes procedencias de estos residuos, la composición de estos pueden ser desde muy sencilla (solo un componente) hasta muy compleja (mezcla de componentes muy diferentes) [1].

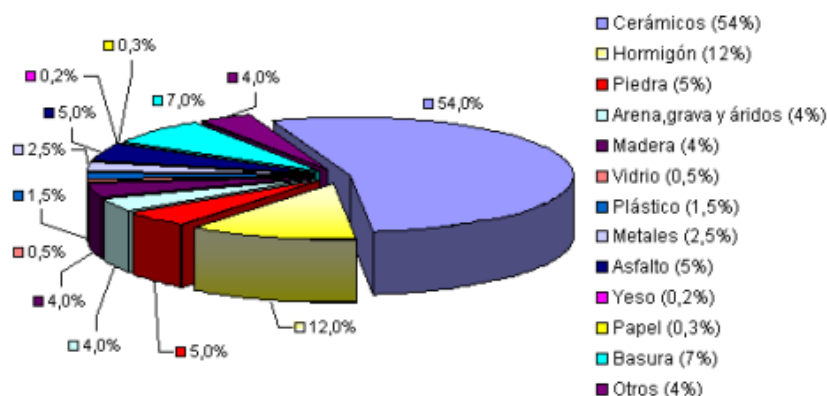


Figura 1: Composición de los RCD [1]

2.2.- Tipos de áridos reciclados

Los tipos de áridos pueden clasificarse según su composición en áridos reciclados de hormigón, cerámico o mixto; se analizan a continuación.

2.2.1.- Áridos reciclados de hormigón

Esta tipología de árido reciclado se obtiene después de ejecutar los siguientes procedimientos que transforman el hormigón en árido: triturar, tamizar y procesar los residuos de hormigón de cemento de clinker de Portland y áridos naturales, en plantas de reciclado. El árido que se extrae proviene de un solo tipo de material, el hormigón, cuya composición es heterogenea (cemento, agua, árido, aditivo y adiciones). El producto resultante no se puede considerar un material uniforme. Un factor muy importante del árido resultante es la cantidad de mortero adherido, ya que condicionara parámetros como la fluencia y la retracción del hormigón resultante.

2.2.2.- Árido reciclado cerámico

Árido que se obtiene de procesar residuos con presencia predominante de material cerámico, el 85% de este árido debe tener una densidad seca superior a 1600Kg/m^3 para evitar que los materiales sean excesivamente porosos y ligeros [2].

2.2.3.- Árido reciclado mixto

En el caso de la normativa Holandesa; define como árido el que contiene un porcentaje de hormigón del 50% con una densidad seca superior a 2100Kg/m^3 y no más de 50% de materiales pétreos reciclados de diferente naturaleza, como es el caso del material cerámico con una densidad seca superior a 1600Kg/m^3 [2].

2.3.- Obtención de los áridos reciclados

Siguiendo los objetivos que establecen la Unión Europea y la legislación vigente, una de las prioridades en materia de gestión de los residuos de la construcción en Cataluña es la de reciclar y valorizar los escombros y las tierras para poder aprovechar toda la fracción reutilizable, siempre que sea posible. Los diferentes sistemas de tratamiento y las diferentes técnicas utilizadas para la selección, la separación y la clasificación de los residuos que pasan por las plantas de reciclaje se describen a continuación:

2.3.1.- Trituración de los RCD

Las plantas de reciclaje tienen como objetivo la obtención de un material granular en el que su fracción sea menor a 40mm. Para poder obtener esta medida del material granular la maquinaria que se utiliza es similar a las instalaciones de la minería (canteras y graveras), aunque hay modificaciones ya que se trata de un material reciclado.

El material procedente de los escombros o de la demolición debe tener unas medidas determinadas ya que tienen que ser aceptadas por la planta de reciclaje, por una trituradora primaria (1200mm para las plantas fijas y de 400-700mm para las plantas móviles). Este proceso también es determinante para las diferentes características del árido reciclado como son: la forma, la distribución de las partículas y la cantidad de mortero adherido. Para el proceso de trituración pueden ser utilizadas diferentes tipologías de trituradoras.

Tipología de trituradoras:

- Trituradoras de mandíbula: sistema de triturado basado en el movimiento de una mandíbula móvil respecto de otra mandíbula que se encuentra fija. El uso de esta trituradora permite obtener árido con una buena distribución granulométrica para su utilización en el hormigón, ya que se produce una cantidad de finos muy reducida (inferior al 10%), pero la forma de las partículas es más angulosa.
- Molino de impacto: se trata de un impacto rotativo, admite material muy heterogéneo en su entrada, donde las características físicas son muy diferentes. El resultado de este tipo de trituradora es de muy buena calidad, aunque su principal inconveniente es que las partículas sufren un fuerte desgaste con el impacto y producen una gran cantidad de finos (puede llegar a una producción hasta del 40%).
- Trituradora de cono: su funcionamiento es debido al impacto de los martillos libres y oscilantes unidos por un eje giratorio. Podemos utilizar cualquier tipo de material en su entrada, pero se debe vigilar. Debido que la presencia de materiales de baja granulometría puede producir bloqueo, la medida máxima del árido que admite es de 200mm aproximadamente, por lo que son más apropiados para un triturado secundario, la producción de partículas finas se encuentra en una cantidad menor a un 20%.

Pueden existir uno o varios procesos de trituración en los cuales se combinan los diferentes tipos de maquinaria de triturar. Las combinaciones más frecuentes de trituración primaria y secundaria se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 1: Combinación de trituración primaria y secundaria

| Trituración primaria | Trituración secundaria |
|--------------------------|------------------------|
| Trituradora de mandíbula | Trituradora de cono |
| Trituradora de mandíbula | Molino de impacto |
| Molino de impacto | Molino de impacto |
| Molino de impacto | - |

Para poder escoger una combinación u otra, depende principalmente de tres factores: el consumo de energía, el coste de la producción y la calidad del producto.

2.4.- Propiedades de los áridos reciclados aplicados a la fabricación del hormigón

Se conoce como árido reciclado todos aquellos residuos pétreos provenientes de la construcción y demolición de obra civil. Así pues, los residuos de hormigón de cemento, áridos naturales o mixto, triturados, cribados y procesados en plantas de reciclado dan lugar al material denominado "árido reciclado".

La calidad de los áridos reciclados cerámicos o mixtos presenta una gran dispersión, ya que depende de numerosos factores, como pueden ser, entre otros, el grado de limpieza que presentan éstos, las técnicas de procesamiento utilizadas o la calidad del hormigón de origen.

2.4.1.- Granulometría

La granulometría de los áridos reciclados es de gran importancia, ya que tiene un gran efecto sobre las propiedades del hormigón; las diferentes propiedades que se verán condicionadas según la distribución de la medida del árido son la trabajabilidad, la porosidad, la permeabilidad, la resistencia, el grado de compactación y la durabilidad [3].

Cuando se obtiene una distribución continua del árido, este es uniformemente graduado para todas las medidas. El hecho de tener esta uniformidad nos proporciona un grado de compacidad y una resistencia mecánica muy elevados [4].

La distribución granulométrica de los áridos reciclados varía según el proceso de trituración al que sea sometido y podemos modificar la medida ajustando la apertura de la trituradora; el gran problema de utilizar una trituradora es que se produce más cantidad de finos que si utilizáramos una machacadora; la fracción de árido grueso que se obtiene suele variar entre 70% y 90% del árido total producido. Normalmente, la fracción gruesa tiene una curva granulométrica adecuada que puede englobarse dentro de los husos granulométricos que recomiendan algunas normas internacionales (ASTM).

En el caso de la EHE-08 [5], especifica la distribución granulométrica óptima para gravas, arenas o finos que pueden ser utilizados para la fabricación de hormigón. La instrucción tiene como propósito la obtención de una clasificación continua, la cual cosa conduce a una mejor compacidad, y por tanto una mayor resistencia y durabilidad del hormigón. De hecho obtendríamos una curva donde la distribución granulométrica sería continua y no uniforme, garantizando así las propiedades óptimas tanto del hormigón fresco como del endurecido.

2.4.1.1.- Contenido de finos < 0.063mm

En el proceso de trituración el árido reciclado genera una cantidad de finos (pequeñas partículas que se desprenden) según algunos ensayos realizados en el laboratorio. El porcentaje de finos puede variar entre 0.27% y 1.14% situándose por debajo del límite del 1.5% de árido grueso establecido por la EHE [5].

La aparición de partículas finas en la superficie del árido reciclado puede originar problemas de adherencia entre el árido y la pasta de cemento, provocando un aumento de la cantidad de agua de amasado necesario.

2.4.2.- Mortero adherido

El árido de fracción gruesa contiene una cantidad de mortero adherido, el hecho que contenga una cierta cantidad de mortero, lo diferencia entre las propiedades de un árido natural y un árido reciclado, una menor densidad, una capacidad de absorción más grande, reacción alcalino-árido, ataque de los sulfatos y el ataque de los cloruros entre otros, que influyen de manera negativa al hormigón como es el caso de la fluencia, la retracción y los problemas de durabilidad que se presentan. Cuanta más proporción de hormigón adherido en el árido reciclado peor durabilidad presentara el hormigón.

2.4.3.- Densidad y capacidad de absorción

La densidad del árido reciclable se encuentra entre 2100 y 2400Kg/m³ y en el caso de la densidad saturada con superficie seca varía entre 2300 y 2500Kg/m³ viendo la diferencia de densidad que presentan los áridos se pueden considerar como áridos de densidad normal, ya que presentan una densidad superior a 2000Kg/m³ definido por la norma UNE 146.120:97 "Áridos para hormigones. Especificaciones" [2].

De las propiedades físicas del árido reciclado, la que presenta mayor diferencia hacia el hormigón natural es la absorción, ya que presentan una elevada absorción debido a la pasta de cemento que queda adherida en el árido natural y los cerámicos. El rango de valores de absorción está entre 4-10% de hecho este rango de valores incumplen el valor límite de la EHE que establece un 7%.

La influencia de la medida de la partícula y la calidad del hormigón original, afecta en la densidad y en la capacidad de absorción. Para las fracciones más pequeñas se presenta menor densidad y una mayor adsorción que en el caso de las fracciones más grandes [2,5].

Según la calidad, tanto el hormigón original como los hormigones de baja relación agua/cemento son los que tienen una elevada resistencia, forman áridos reciclados de más calidad, por lo tanto una mayor densidad y una menor adsorción. Por otro lado, de una misma planta de reciclado donde se trabaje con diferentes niveles de resistencias (10-50N/mm²) se producirán áridos con un rango de coeficiente de absorción muy amplio, entre un 10% y un 5% respectivamente [6].

Otro factor que influye en estas propiedades son las técnicas de procesado: si al árido grueso reciclado se ha pasado por sucesivas etapas de trituración entonces se produce una mayor eliminación de la cantidad de mortero adherido en el árido y por tanto la calidad del árido mejora substancialmente, donde la capacidad de absorción disminuye y hay un incremento de densidad; debido a esta mejora, el árido reciclado asume unos valores cercanos al de los áridos naturales.

2.4.4.- Coeficiente de forma

El coeficiente de forma y el índice de las de los áridos reciclados que proceden de los hormigones tienen valores similares y pueden llegar a tener mejor resultado que los obtenidos por los áridos naturales [7]. En el caso de los áridos cerámicos de diámetro nominal superior a 20mm se pueden obtener valores peores que los obtenidos en el árido natural, no obstante en la mayoría de casos cumplen los requisitos exigidos por la EHE.

2.4.5.- Coeficiente de los Ángeles

En el coeficiente de los Ángeles también se produce un incremento de los valores respecto al que se había obtenido por áridos naturales. Los valores más elevados corresponden a muestras con un elevado contenido de partículas de mortero, y los valores más reducidos son los que provienen de las muestras de origen cerámico.

Este ensayo se utiliza para evaluar la resistencia a abrasión, el desgaste y el impacto de los agregados. El valor de los áridos reciclados se puede situar en un rango muy amplio, entre el 25-45% dependiendo entre otros factores, del tamaño de las partículas y la calidad del hormigón original [5,7].

Normalmente, el coeficiente de los Ángeles aumenta en las fracciones de menor medida, ya que son las que contienen una mayor cantidad de mortero adherido al árido natural. En disminuir la relación agua/cemento del hormigón original, el coeficiente de los Ángeles también disminuye, y pueden encontrarse diferencias en el valor del coeficiente de hasta un 10% en los resultados correspondientes a un amplio rango de las relaciones agua/cemento (1.2-0.4) [2].

La normativa EHE, establece un coeficiente máximo del 40% para su aplicación en hormigón estructural y no estructural, de manera que el árido grueso reciclado en la mayoría de los

casos podrán cumplir este requerimiento. Además, se tendrá que realizar controles para detectar aquellas partidas que lo incumplan, de forma que la limitación del 7% de absorción selecciona partidas con coeficiente de los Ángeles siempre menor al 40% [8].

Como se ha mencionado anteriormente, los valores más elevados corresponden a las partículas con un elevado contenido de mortero y los valores más reducidos a muestras mayoritariamente de origen cerámico.

2.4.6.- Contaminantes e impurezas

Uno de los principales problemas que conllevan los áridos reciclados es que habitualmente pueden incorporar impurezas y contaminantes que influyen de forma negativa en las propiedades del hormigón. El origen de estos contaminantes puede ser muy variado entre ellos: plástico, madera, vidrio, materia orgánica, aluminio, asfalto...

Las impurezas del árido reciclado producen en todos los casos un descenso de la resistencia del hormigón, en caso de encontrarse cal o arcilla todavía sería más relevante este descenso en la resistencia. Además de reducir la resistencia, según la tipología de la impureza se pueden originar otros problemas, como son las reacciones alcalino-árido (vidrio), ataques por sulfatos (yeso), una elevada retracción (arenas arcillosas) o un mal comportamiento de los ciclos de hielo-deshielo [2,4].

Para determinar el contenido de impurezas más grande se puede adoptar la norma UNE 7133-58:200 "Determinación de terrones de arcilla en áridos para la fabricación de morteros y hormigones.", habrá que cuantificar y clasificar las impurezas que contenga el árido (metal o asfalto).

La normativa europea específica la determinación de la composición de los áridos reciclados, UNE EN 933-11:2010 "Test for geometrical properties of Aggregates". Parte 11: "Classification test from the constituents of coarse Recycled Aggregates". Es necesario analizar todos aquellos componentes presentes en los áridos reciclados ya que pueden causar problemas de durabilidad. Entre dichos componentes los que destacan son los cloruros, sulfatos y las reacciones alcalino-áridas. La normativa establece la siguiente clasificación para los constituyentes del árido reciclado.

Tabla 2: Normativa UNE EN 933-11:2010

| Designación | Origen |
|-------------|---|
| Rc | Hormigón, productos de hormigón y mortero Unidades de obra de hormigón |
| Ru | Áridos no tratados, piedra natural Áridos tratados con conglomerantes hidráulicos Unidades de obra de arcilla |
| Rb | Unidades de obra de silicato cálcico Hormigón aireado no flotante |

| | |
|-----------|-----------------------------------|
| Ra | Materiales bituminosos* |
| Rq | Vidrio |
| Rx | Madera, plástico y caucho Yeso |

La EHE establece los siguientes contenidos máximos para los diferentes tipos de impurezas mencionadas anteriormente en el árido grueso:

- Contenido máximo de partículas ligeras: 1% del peso total de la muestra.
- Contenido máximo de terrones de arcilla: 0.25% del peso total de la muestra.
- Compuestos totales de azufre expresados como S: 1% del peso total de la muestra (contenido de azufre soluble en ácido expresados como SO₃ inferior al 0.8%).

2.5.- Diseño de la mezcla de un hormigón con árido reciclado

De acuerdo a Etxeberria et al. [9], el hormigón reciclado se puede dosificar, mezclar, transportar, colocar, compactar y curar de la misma manera que el hormigón convencional. No obstante, debido a la capacidad de absorción del material es recomendable que el árido este con una alta humedad para reducir su capacidad de absorción y de esta manera no influya en la trabajabilidad del hormigón fresco y que se pueda controlar la relación de agua/cemento efectiva.

Para una buena dosificación del hormigón es importante tener en cuenta estos factores [9,10]:

1. Determinar la densidad del árido reciclado y natural para definir su mismo volumen de árido reciclado utilizado en sustitución del árido natural.
2. Medir la capacidad de absorción del agua que tienen los áridos reciclados a la hora de fabricar y añadir la cantidad de agua que será absorbida por ellos en 10 o 30 minutos para asegurar la trabajabilidad y una relación agua/cemento efectiva constante.
3. Es posible que sea necesario ajustar la relación de agua/cemento para que el hormigón con el árido reciclado obtenga una resistencia parecida al hormigón convencional.
4. Se tiene que valorar la cantidad de agua que se necesita para obtener la relación de agua /cemento necesaria.
5. Para tener una adecuada unión entre el árido reciclado y la pasta de cemento, es recomendable realizar la mezcla en dos fases [10]: los áridos finos y los gruesos se mezclan en la amasadora durante 1 minuto. Se añade la mitad de agua necesaria y se mezcla 1 minuto más. A continuación se añade el cemento y se vuelve a mezclar durante 1 minuto. Por último se acaba de añadir la mitad del agua restante y se mezcla durante unos 90 segundos. Si se utilizara cenizas volantes se mejoraría la interfase entre la pasta del cemento y el árido.
6. Los hormigones reciclados dosificados con el método denominado Volumen de Mortero Equivalente (VME) [11] obtienen propiedades parecidas al hormigón convencional. En este caso, el árido reciclado procedente del hormigón es tratado

como material constituido por dos fases, mortero y árido natural. Cuando se determina el porcentaje de cada fase se consideran por separado y por tanto, este método no supone que el árido reciclado substituya solamente el árido natural sino que reemplaza el árido grueso y el mortero.

En conclusión se puede determinar, que para obtener una misma resistencia, consistencia y trabajabilidad que un árido natural, se tendría que variar las proporciones de agua y cemento.

Se quiere conseguir una misma consistencia, la demanda de agua del hormigón con árido grueso reciclado es del orden de 5-10% más grande que para el hormigón convencional.

Si se necesita una mayor demanda de agua, el contenido de cemento necesario será un poco más grande para el caso de hormigones con áridos reciclados que para el caso de los convencionales, así se obtendrá una misma resistencia.

2.6.- Propiedades físicas del hormigón reciclado

Los estudios que determinan las propiedades físicas son la densidad, que será analizada seguidamente, la porosidad y la permeabilidad que se analizarán en el apartado "1.8.2 Durabilidad. Propiedades físicas".

2.6.1.- Densidad

Resultados experimentales [12] muestran una densidad media del hormigón reciclado de 2250Kg/m^3 , aproximadamente un 3.6% inferior a la densidad observada en el hormigón convencional de 2230Kg/m^3 .

2.7.- Propiedades mecánicas del hormigón reciclado

A continuación se explican las propiedades físicas y mecánicas del hormigón reciclado. Como detallan los estudios mencionados a continuación la importancia de la zona de transición entre el mortero y el árido reciclado será un aspecto muy importante, ya que influirá a las propiedades mecánicas del hormigón reciclado.

2.7.1.- Resistencia a la compresión del hormigón reciclado

Butler et al. [13] estudia el fenómeno de rotura a compresión, asumiendo la capacidad resistente de la fase de mortero como constante, en probetas cilíndricas de un hormigón reciclado que contiene áridos reciclados y naturales de nueva aportación. Estableciendo que el factor limitante de la resistencia del hormigón reciclado se encuentra en las zonas de transición intersticial existentes en el árido reciclado original (entre el árido natural y el mortero adherido) o bien los de nueva creación (entre los morteros originales y nuevos) los planes de rotura que atraviesan los áridos reciclados indican en tal caso que la resistencia de los mismos es el factor limitante. La conclusión que se extrae del estudio es que la unión es más resistente en las ITZ (Interfacial transition zone) de nueva creación y de entre estas, lo es más entre los de mortero original y nuevo que no en las zonas de transición intersticial entre el mortero nuevo y el árido natural.

Liu et al. [14] explican que, en aquel caso en que el hormigón original tiene una resistencia a compresión más baja que la del hormigón reciclado resultante, el mecanismo de rotura por compresión por la acción combinada de la superficie rugosa y la forma irregular de los áridos reciclados provoca la concentración de tensiones que a la vez induce a la fisuración a lo largo de la superficie de los áridos naturales originales. Las investigaciones también observan que en comparación con las zonas de transición intersticial que envuelven al árido fino, las ITZ de

alrededor de los áridos gruesos tienden a contener más discontinuidades y a tener tamaños más grandes, reduciendo la resistencia del hormigón. Por otro lado, absorben energía durante el proceso de rotura, mejorando la ductilidad del material. Los artículos apuntan también que la resistencia a la compresión del hormigón reciclado se incrementa con las ganancias de esta propiedad que experimenta la fracción de mortero nuevo en su endurecimiento.

Otras investigaciones confirman [9], que la adquisición de la resistencia a la compresión en el hormigón reciclado se obtiene por la textura rugosa y la capacidad de absorción del mortero adherido original, que proporciona una mejor unión entre la pasta de cemento y los áridos reciclados, respecto de un hormigón convencional.

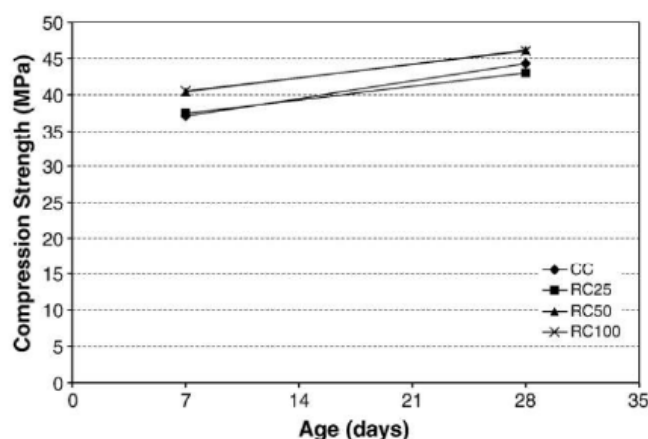


Figura 2: Evolución de la resistencia a compresión de 7-28 días, con la sustitución de áridos reciclados

Los resultados de la investigación de Gomes y de Brito [15] muestran que la resistencia a la compresión no se ve alterada en la sustitución de árido natural por árido reciclado cuando los áridos reciclados aportan una alta fracción de mortero endurecido original con gran resistencia mecánica. Otro fenómeno observado se relaciona con el proceso de mezcla que se utiliza, que incorpora la cantidad de agua en dos fases separadas en el tiempo dejando que la pasta de cemento envuelva mejor los áridos reciclados y esto se refleje en zonas ITZ más resistentes, rellenando las fisuras y los poros presentes en los áridos reciclados.

Según la experiencia de Rahal [12], el hormigón reciclado en comparación con el respectivo hormigón convencional de control, que obtiene una gran mejoría de la resistencia que tiene a los 28 días durante los primeros 7, sigue adquiriendo buena parte de las propiedades resistentes más allá del periodo inicial de maduración de 28 días. Pasados 56 días desde la producción de ambos hormigones, el aumento de las resistencias a compresión en el hormigón reciclado y el hormigón de control es respectivamente del 7% y el 4% de la resistencia característica a los 28 días. En resumen y según expone el autor, la relevancia de las diferencias en las reducciones de la capacidad resistente muestra el efecto de factores diversos tales como el origen de los áridos reciclados y hace patente la necesidad de particularizar la caracterización de los materiales utilizados para poder describir el comportamiento de manera cuidadosa.

Los últimos resultados de la investigación de Thomas et al. [17] demuestran que, a edades tempranas, el comportamiento de los áridos tiene una mayor influencia en el comportamiento del hormigón fabricado con árido reciclado. Por lo tanto, los hormigones con una sustitución de áridos reciclados tienen pequeñas diferencias en su resistencia a la compresión para diferentes relaciones agua/cemento. A edades más avanzadas, el hormigón de árido reciclado

con una relación agua/cemento baja exhibe una mayor resistencia. Por lo tanto, la influencia de árido reciclado sobre las propiedades mecánicas del hormigón es mayor para las más bajas relaciones agua/cemento.

2.7.2.- Resistencia a la tracción del hormigón reciclado

Etxeberria et al. [9] constatan en su experimentación que la resistencia a tracción indirecta del hormigón reciclado es más alto que en el hormigón de control por el efecto de la capacidad de absorción del mortero adherido original. El hecho de que no haya efectos perjudiciales en la resistencia a tracción del hormigón reciclado es indicativo de las buenas características de la unión entre los áridos reciclados y la matriz del mortero. En los resultados de su estudio todos los hormigones reciclados obtienen resistencias a tracción mayores que los respectivos hormigón de control, excepto en el caso de dosificar la mezcla con un porcentaje de sustitución del 100%.

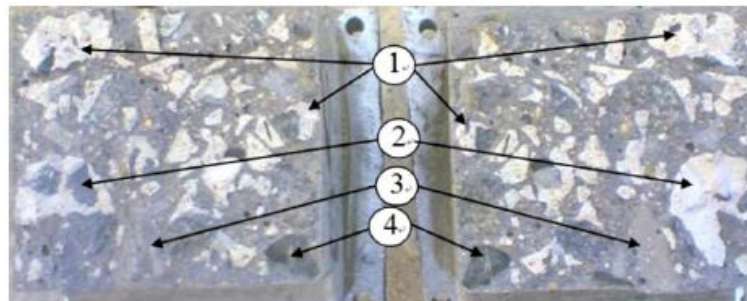


Figura 3: Rotura a tracción de una sección de hormigón reciclado [14]

Tabsh et al. [16] hacen un estudio en hormigones reciclados a partir de áridos de hormigones originales con diferentes resistencias características de diseño. En el hormigón reciclado obtenido a partir de áridos reciclados de un hormigón de 50MPa no se aprecian diferencias en la resistencia a tracción entre el hormigón reciclado y el de control. Sin embargo, cuando el origen de los áridos reciclados es un hormigón de 30MPa y también si la fuente es desconocida se observan descensos en la capacidad resistente a la tracción entre un 10% y un 15% si el hormigón reciclado se produce para que tenga una resistencia a la compresión elevada de 50MPa, y entre un 25% y un 30% cuando el hormigón reciclado producido también se caracteriza a los 30MPa.

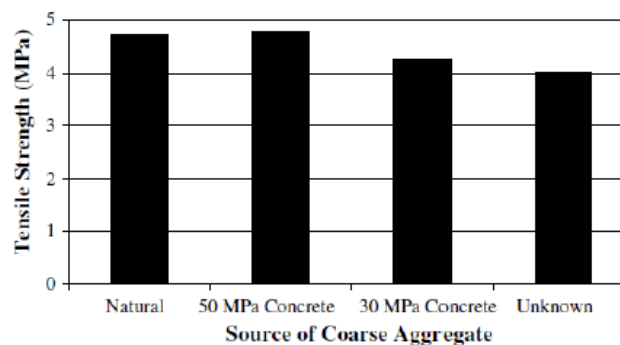


Figura 4: Resistencia a tracción [16]

En la misma línea de investigación, Butler et al. [13] hacen notar la sensibilidad de la resistencia a tracción (indirectamente ensayada) a las características resistentes de los áridos reciclados caracterizados por altos niveles de resistencia a la compresión, condiciones por las cuales es necesario mantener bajas las relaciones agua/cemento, produciendo así morteros muy resistentes.

A partir de la experiencia de Rahal [12], la resistencia a tracción indirecta es de un 87.7% de media respecto a la del hormigón convencional, proporción parecida a la del análisis de la resistencia a compresión del hormigón reciclado. En el mismo ensayo de determinación de la resistencia a tracción efectuado a los 56 días se observan resultados de un 8% y un 5% más alto que en el ensayo a 28 días, respectivamente para el hormigón reciclado y el correspondiente hormigón de control.

2.7.3.- Módulo elástico del hormigón reciclado

Según Etxeberria et al. [9], el módulo elástico del hormigón reciclado se ve reducido por incrementos en el tanto por ciento de sustitución con áridos reciclados, ya que los áridos reciclados son más propensos a la deformación que los áridos naturales. Asimismo, el módulo del hormigón depende significativamente del módulo elástico de los áridos y se puede esperar este comportamiento en el hormigón reciclado.

Para Liu et al. [14] el nuevo mortero endurecido presente en el hormigón reciclado tiene una influencia significativa sobre su módulo de Young, cosa que implica que los efectos del mortero endurecido original sean minoritarios, principalmente por causas de la calidad y la distribución del mortero endurecido original: volúmenes más grandes de mortero de nueva producción lo hacen el factor dominante del módulo elástico. Estas observaciones no entran en contradicción con las expuestas en párrafos anteriores si tenemos en cuenta que para el análisis fotográfico de la composición del producto final, los autores utilizan un hormigón blanco menos resistente en la elaboración del hormigón original (de lo que los áridos reciclados se componen) y un hormigón gris de alta resistencia para configurar la nueva matriz de mortero: así precisamente porque el módulo elástico está gobernado por el volumen de la fracción y el módulo de Young de los áridos que utiliza [18], la peor calidad de los áridos reciclados hacen que sea el mortero de nueva creación la fase más contribuyente al rendimiento mecánico del material.

Rahal [12] observa significativos aumentos del módulo elástico por incrementos de la resistencia a compresión en hormigones convencionales, observación menos obvia en el caso de hormigones reciclados ya que las dosificaciones de los elementos ensayados resultan en resistencias a la compresión entre 25 y 30MPa, rango por el cual la comparación entre ambas variables (el módulo y la resistencia) muestran una reducción de tan solo el 3% en el módulo elástico del hormigón reciclado respecto al correspondiente al de control.

Gomes y de Brito [19] señalan que los resultados del ensayo del módulo de elasticidad más bajos para hormigones reciclados es debido a la presencia de mortero adherido en los áridos reciclados originales. Se observan pequeñas afectaciones alrededor del 10% en la pérdida de rigidez del hormigón reciclado para grados de sustitución de hasta el 50% mostrando que la afectación de la capacidad mecánica de este hormigón se encuentra limitado a un cierto nivel, contrariamente a aquello que ha afirmado en algunos casos.

Dhir et al. [18] subscriben que, en general, el módulo elástico es considerado proporcional a la resistencia a compresión a pesar de referirse a casos de estudio en los que se ha visto que el módulo de Young no es proporcional a la capacidad resistente del hormigón o en los que se han observado variaciones de hasta del 15 KN/mm².

2.8.- Durabilidad del hormigón

La mayor parte de los estudios realizados hasta ahora sobre los hormigones reciclados han analizado las propiedades físicas y mecánicas de estos. A continuación, se desarrollará las propiedades del hormigón reciclado en el caso de la durabilidad tales como el comportamiento que se puede esperar del hormigón reciclado.

2.8.1.- Características físicas

2.8.1.1.- Porosidad

En las investigaciones realizadas [20], la porosidad se mide a través del método de la intrusión de mercurio (ATSM 04404). Este ensayo se realiza en probetas cilíndricas de diámetro de 0.02m y altura de 0.1m, las probetas tienen que estar curadas en la cámara húmeda y analizadas a los 7 y 28 días.

Las probetas de 7 y 28 días son deshidratadas, sumergidas en alcohol durante 8 días y posteriormente secadas a una temperatura de 70°C unas 24 horas, finalmente las probetas son puestas en el secador hasta la realización del test. MIP; introducción de la presión, mide el radio teórico de los poros donde en el proceso incluye la típica intrusión y extrusión por ciclos, se mide la MIP presión ejercida contra el volumen introducido de mercurio [20].

En el caso del hormigón convencional y del hormigón con árido reciclado, para una misma dosificación, presentaban una dosificación parecida a los de 28 días de curado. Pero después de 5 años de curado con agua, se detectan diferencias significativas. Después de 5 años, el hormigón fabricado con áridos reciclados procedentes de hormigón obtuvieron una porosidad menor que la convencional, la porosidad es casi un 45% respecto la obtenida a los 28 días, y en cambio el hormigón convencional se obtuvo una reducción del 7% de los 28 días a los 5 años [21].

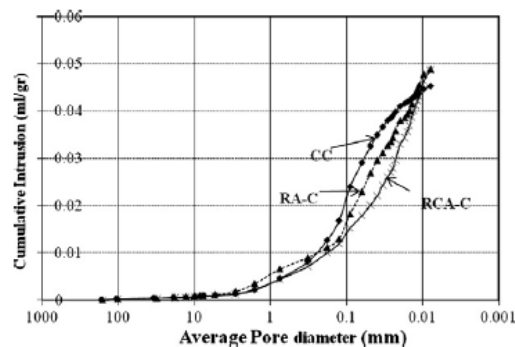


Figura 5: Medida de los poros a los 28 días según el tipo de hormigón [21]

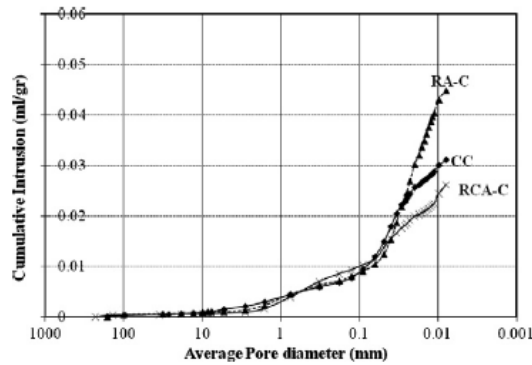


Figura 6: Medida de los poros a los 5 años según el tipo de hormigón [21]

En el caso de los hormigones sustituidos por el árido natural un 50% y 100% de árido reciclado, se comprueban que tienen unas densidades menores y una alta capacidad de absorción de agua que los áridos naturales, principalmente debido a una mejor porosidad del mortero adherido [22].

El factor de sustitución de los áridos reciclados demuestra una correlación entre el volumen total y la medida del poro; esta influencia empieza a ser importante en las primeras edades del hormigón y va disminuyendo con la edad del hormigón, esto se atribuye a la cristalización de los nuevos productos para reducir el número y la medida del poro [23].

2.8.1.2.- Permeabilidad

- Permeabilidad. Flujo de agua

En el caso del hormigón reciclado endurecido, algunos estudios demuestran que el uso de áridos reciclados hacen que el hormigón sea significativamente más permeable que los hormigones fabricados con áridos naturales, esto influye en las propiedades de la durabilidad, que estas pueden ser mejoradas usando algún tipo de aditivo como es la ceniza volante o el humo de sílice [19].

Para un hormigón con 100% de árido sustituido se encontró que tenía un índice de permeabilidad del agua de $2.3 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{min}^{1/2}$ que se muestra un incremento de un 21% en comparación con el hormigón convencional (muestra de control) [24].

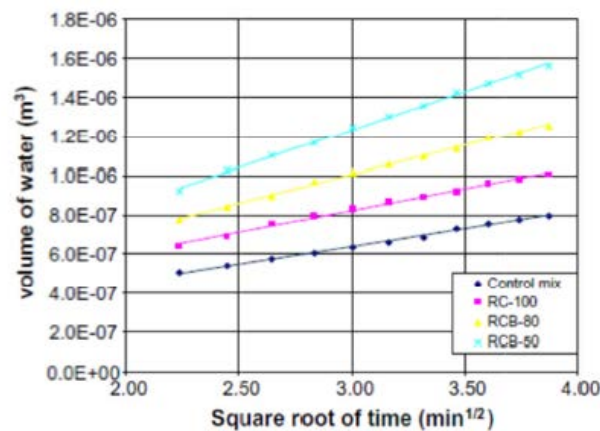


Figura 7: Permeabilidad según % del árido reciclado sustituido [24]

-Permeabilidad del oxígeno (OPI)

Describe el movimiento de los fluidos a través de la estructura de poros bajo la presión aplicada externamente, mientras que los poros se saturan con un fluido particular.

Por lo tanto, la permeabilidad se refiere a una medida de la capacidad del hormigón para el transporte de fluidos por penetración y es dependiente de la microestructura del hormigón, la condición de humedad del material y las características del fluido que penetra.

Esta técnica implica la medición de la caída de presión del gas oxígeno que se hace pasar a través de una muestra de hormigón.

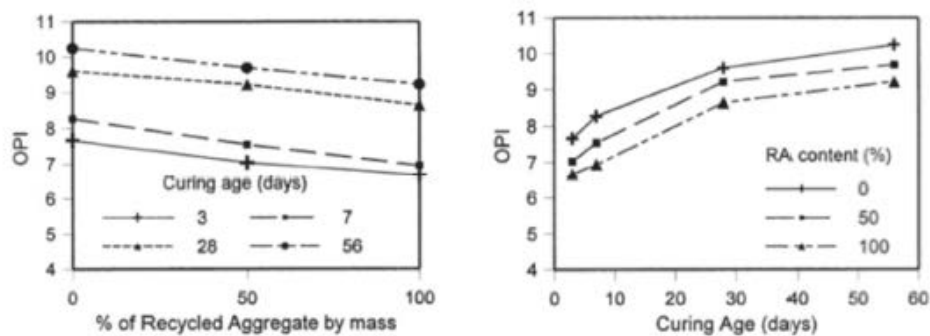


Figura 8: Permeabilidad al paso del oxígeno [25]

En las figuras anteriores, se observa que a una edad de curado dada, el OPI va disminuyendo por incrementos en la proporción de árido reciclado en una mezcla de hormigón.

En el caso de las mezclas de hormigón curado durante un periodo de 3 días, el aumento del contenido de árido reciclado es de 0% al 100% y se produjo una reducción del 15% del valor del OPI. Reducciones correspondientes a las mezclas de hormigón que se curaron durante un periodo de 7, 28 y 56 días, son 16%, 10% y un 10% respectivamente.

Esta tendencia de la reducción del OPI, con los aumentos en los niveles de sustitución de los áridos reciclados, se espera que para una muestra de hormigón reciclado presente fisuras y grietas en las muestras de áridos, ya que han sido sometidas a procesos de trituración y por eso puede hacer que tenga un comportamiento más débil en el caso del árido. Además las fisuras y grietas de los áridos crean trayectorias para facilitar el paso de los fluidos a través de la mezcla resultante de hormigón en el que se incorpora [25].

Los últimos resultados de la investigación de Thomas et al. [17], la permeabilidad al oxígeno presenta un mejor ajuste con el agua / cemento de la permeabilidad al agua. La durabilidad de los áridos reciclados con la misma relación agua/cemento, es inferior a la del hormigón convencional debido a la mayor porosidad de los áridos reciclados. Sin embargo, en hormigones de baja relación agua/cemento, la baja porosidad de la nueva pasta es predominante por lo que el avance de los agentes agresivos se retrasa, la obtención de un comportamiento similar para el control y hormigones reciclados.

2.8.2.- Durabilidad. Procesos físicos

2.8.2.1.- Resistencia del hormigón reciclado a altas temperaturas

Un aspecto importante de analizar es el comportamiento del hormigón reciclado a altas temperaturas frente a los hormigones convencionales y a los hormigones convencionales con cenizas volantes y escorias de alto horno eléctrico “GGBS” (sustituyendo entre 33-55%) [26].

Se han realizado diversos estudios [27,28] donde se pone de manifiesto la respuesta del hormigón fabricado con áridos reciclados procedentes del hormigón, a diferentes temperaturas estudiando sus propiedades mecánicas y la durabilidad de este, y cómo influye el porcentaje de árido natural que ha sido sustituido por el árido reciclado.

La respuesta de la resistencia a compresión es determinante para saber el grado que ha sido deteriorada la probeta respecto a la temperatura. Después de la exposición de una temperatura a 300°C se obtuvo que los hormigones fabricados con cenizas volantes y GGBS tenían unas resistencias mayores que las del hormigón convencional de Portland (un 15% y un 8% respectivamente). A pesar de todo, la mejora de resistencia obtenida con las adiciones es debida a la reacción puzolánica que consume el Ca(OH)_2 . Aunque esta mejora del hormigón convencional con las adiciones, no era comparable con los valores obtenidos con el hormigón reciclado sustituido el 100% del árido natural por el árido reciclado, ya que la resistencia a compresión era más grande [26].

Además, después de la exposición a altas temperaturas del hormigón reciclado se determinó que había un incremento de la porosidad menor que en los hormigones convencionales, y que la medida del poro era menor que en el caso del hormigón fabricado con árido natural.

Los hormigones elaborados con la sustitución del 100% del árido natural por árido reciclado sufrieron menos daño en cuanto a sus propiedades mecánicas y de durabilidad que en el caso del hormigón convencional [23].

Por lo tanto, se puede concluir mediante diversos estudios experimentales que los hormigones con áridos reciclados, que tienen una relación menor agua/cemento se comportan de mejor forma que los hormigones convencionales cuando estos están expuestos a altas temperaturas [27].

2.8.2.2.- Resistencia, ciclos hielo-deshielo

Se consideró que los hormigones fabricados con áridos reciclados se comportaron de forma adecuada en los ciclos de hielo-deshielo y que el mortero que se encontraba adherido no afectaba de forma negativa al rendimiento del hormigón [28].

Por otra parte también se concluyó que utilizando áridos reciclados que no provenían de hormigones con aire incorporado, la resistencia era bastante pobre; en cambio, si se utilizaba un árido que incorporaba un aireado en su naturaleza estos hormigones eran altamente resistentes.

Las deficiencias más probables en el rendimiento de los hormigones de áridos reciclados frente a los ciclos de hielo-deshielo puede ser atribuida a la estructura de los poros de la pasta de cemento endurecido previamente que se adhiere a la superficie de los áridos reciclados, ya que la matriz de los poros absorbe agua durante la mezcla, incrementando la relación de agua/cemento de la pasta [29].

Los resultados obtenidos [29] demuestran que las probetas cúbicas de hormigón reciclado son ligeramente más durables que las probetas fabricadas con hormigón convencional. Además si a las probetas les introducimos la adición de fibras de polipropileno aún se mejorará más la resistencia media a compresión de las probetas cúbicas 13.8 N/mm^2 mientras que las probetas realizadas con el hormigón convencional más las fibras de polipropileno se obtiene una resistencia de 12.9 N/mm^2 , una diferencia de un 7% que está dentro de la tolerancia de la dosificación normal.

Las probetas de hormigón reciclado son más durables que las probetas realizadas con el hormigón convencional en un 68% [35].

Además, se han realizado estudios donde el árido reciclado utilizado por el hormigón contiene impurezas por sulfatos, y una vez realizados 14 ciclos de hielo-deshielo; las inspecciones visuales no permiten detectar cualquier deterioro significativo de la muestra, obteniendo una correlación entre la pérdida de masa y la absorción de agua que determinó que la pérdida de masa en los áridos reciclados contaminados no era superior al 1% [4]. Estos hormigones tienen una resistencia muy buena en el clima invernal extremo, aunque tengan una mayor porosidad [30].

2.8.2.3.- Fluencia y retracción

En el caso de la fabricación de hormigones reciclados, si se sustituye un 100% del árido natural por árido reciclado y se estudia este hormigón a la edad de 180 días se puede observar que hay un incremento en las deformaciones por fluencia del 52% y por la retracción del 70%, en comparación con el hormigón convencional [31].

Si se observa más detalladamente los fenómenos que afectan al comportamiento físico del hormigón nos encontramos que en el caso de la fluencia, para un hormigón reciclado con una sustitución del 20% se encontró que era un 42% mayor que el hormigón convencional, mientras que para un nivel de sustitución del 100% el incremento de la deformación de la fluencia va a ser del 51%.

Y en el caso de la retracción, los hormigones reciclados van a aumentar después de 28 días; si el árido natural es sustituido en un 20%, estos presentan una retracción similar al hormigón convencional en las primeras edades. Durante un periodo de 6 meses la contracción en los hormigones reciclados fue un 4% superior en el caso de un nivel de sustitución del 50% y después de 6 meses este aumento estuvo alrededor de un 12% superior al hormigón convencional.

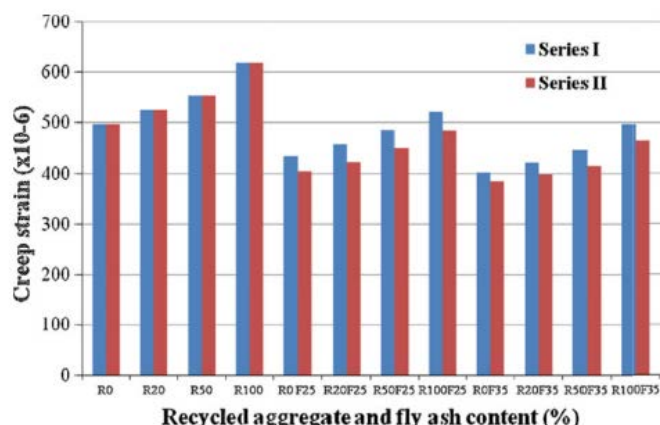


Figura 9: Retracción a los 120 días de curado, hormigón reciclado y hormigón reciclado con adición de cenizas volantes [32]

En el caso que se introduzca una adición al hormigón reciclado como, por ejemplo, humo de sílice, se daría una pequeña disminución de la fluencia del hormigón, ya que esta adición tiene mejoras sobre la porosidad y la permeabilidad que tienen influencia sobre la fluencia y la retracción del hormigón [33].

Finalmente, los estudios demuestran que el fenómeno de la fluencia disminuye pasado un año y se obtienen valores un 20% (aproximadamente) menores al hormigón convencional.

2.8.3.- Durabilidad. Procesos químicos

2.8.3.1.- Corrosión del acero dentro del hormigón

La oxidación del hierro de las armaduras del hormigón armado y pretensado o de otros elementos de acero incluidos dentro del hormigón lo convierte en óxidos de hierro (II) y de hierro (III). Estos productos se forman en la superficie de las armaduras aumentando su volumen, por lo que provoca la fisuración y el desprendimiento del recubrimiento del hormigón que las protegía del aire. Esto provoca una aceleración de la corrosión.

Los aceros recubiertos de hormigón no se oxidan debido al pH altamente alcalino (12-13) del hormigón. Se forma una capa de óxido en la superficie de micras de grosor que protege el interior (pasivación). La oxidación es causada por iones cloruro que difundiendo a través del hormigón entran en contacto con el elemento del acero rompiendo la capa de pasivación y oxidando el acero.

El hormigón con el tiempo se va carbonatando por la acción del dióxido de carbono del aire. Esta carbonatación disminuye el pH y el acero deja de pasivarse. Entonces el oxígeno del aire húmedo penetra por los poros, oxidando así el acero.

2.8.3.2.- Ataque por cloruros en los hormigones reciclados

Si se tiene en cuenta el método EMV, donde la hipótesis que los áridos reciclados que provienen de otro hormigón es como un mortero de material compuesto y áridos naturales [34], donde se mide la concentración inicial de cloruros.

Los coeficientes de difusión aparentes de los cloruros de todas las muestras de hormigón reciclado, realizadas por el método EMV resultaron ser del mismo orden de magnitud que las muestras realizadas por el hormigón convencional.

La resistencia a la penetración de los cloruros en el hormigón de áridos reciclados fue mejorada con la adición de materiales (EMV) suplementarios como sustitución parcial del cemento Portland.

En el caso de los áridos reciclados que se encuentran contaminados, se demuestra que son más sensibles a los cloruros que a los sulfatos, y que la sensibilidad a la corrosión repercute en el peso del cemento, entre 0.3 y 0.5% e incluso por debajo de estos valores, puede generar un riesgo de corrosión. La probabilidad de que afecten a las armaduras de refuerzo en el hormigón es del 100% con los áridos reciclados contaminados [35].

Si no se tiene en cuenta el método EMV y se utiliza el método convencional se demuestra que cuanto más tiempo dure el curado menor será la conductividad del hormigón reciclado; por ejemplo, para el caso de 0% de árido reciclado (hormigón convencional) la probeta que fue curada durante 56 días tenía un 69% de aumento en la conductividad de cloro frente a la probeta que solo se curó 3 días [2].

En el caso de sustitución del 50% y 100% del árido por árido reciclado fue de un 62.7% y un 59.2% respectivamente.

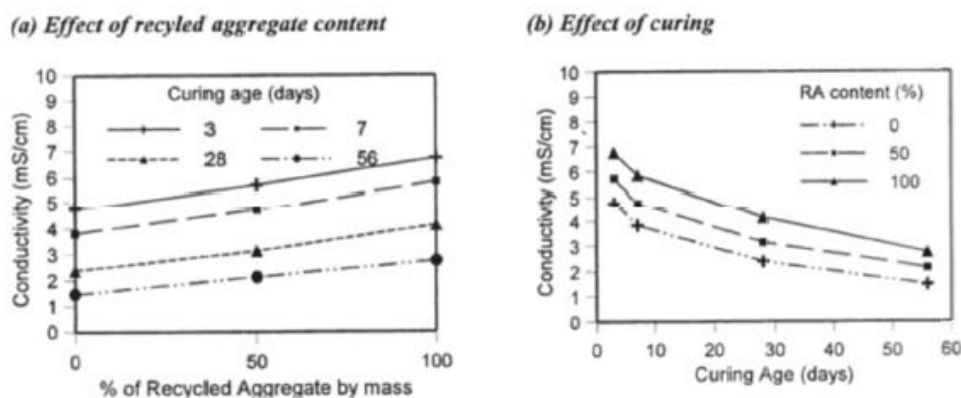


Figura 10: Conductividad (paso de los iones cloruros) [2]

En comparación con los valores recomendados por la conductividad de cloruros en los hormigones presentando solo el 100% de áridos naturales en el hormigón, llegan a una buena clasificación con un valor de 1.48 mS/cm a la edad de 56 días.

Todas las otras proporciones de mezclas caen por debajo de la clasificación de pobres o malas. De hecho, la naturaleza más débil y la formación de grietas y fisuras en el árido reciclado pueden explicar la tendencia del hormigón con áridos reciclados a propagar fácilmente los iones cloruros.

Si determinamos la respuesta del hormigón a la resistencia y a la penetración de los cloruros según la normativa ASTM C1202, tal y como estudiaron Kou y Poon [33], se analiza la resistencia del hormigón al paso del ion cloruro como la respuesta de la carga total que pasa (Coulomb) durante 6 horas, por las probetas que tienen una edad de 28 y 90 días, se observó que si se aumenta la cantidad de árido reciclado disminuye la resistencia a la penetración pero si introducimos la adición de cenizas volantes, reduciendo la relación agua/cemento mejoraría la resistencia al paso del ion cloruro.

Se puede concluir que la conductividad de cloruros aumenta con los niveles de sustitución de la cantidad de árido reciclado durante un periodo de curado determinado por las proporciones de áridos para el hormigón.

Pero, en un nivel de sustitución particular de los áridos reciclados, a mayor duración del curado, menor será la conductividad de una mezcla de hormigón [30].

Si el hormigón reciclado añade aditivos de naturaleza de cenizas volantes, mejora la permeabilidad del hormigón reciclado y la penetración de los iones cloruros a 90 días serán menores que a la edad de 28 días [32].

En el caso de la adición de cenizas volantes para la sustitución del cemento, aumenta la resistencia a los cloruros, las razones de estas mejoras pueden ser debidas a una redistribución de la medida de los poros, a la formación de más C-S-H productos formado por la hidratación de las cenizas volantes que absorben los iones cloruro [32].

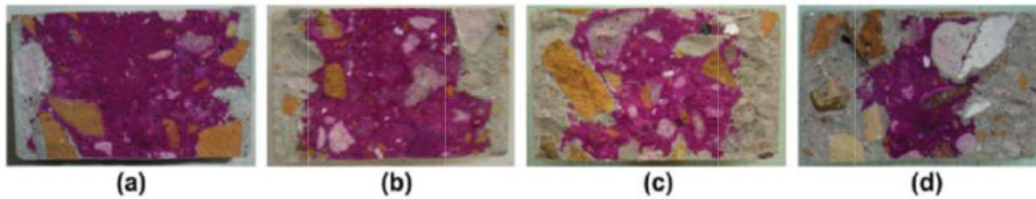
2.8.3.3.- Carbonatación

Los hormigones con áridos reciclados fabricados tienden a presentar un índice de carbonatación ligeramente más altos en la profundidad de dicha carbonatación (unos 5mm), que en los hormigones convencionales, como es el caso del hormigón con el 100% de áridos sustituidos por reciclado donde la profundidad de carbonatación esta alrededor del 43% más alta que en los hormigones hechos con áridos naturales.

No obstante, cuanto mayor es la relación agua/cemento, mayor profundidad de carbonatación habrá. La influencia de la relación agua/cemento en la profundidad de carbonatación del hormigón es debido principalmente a la porosidad de la matriz y a la facilidad de penetración del dióxido de carbono (CO₂) en el hormigón.

La difusión del CO₂ a través del hormigón se produce principalmente debido a los poros capilares interconectados, así como por las microfisuras o burbujas de aire de la matriz.

Tanto en la durabilidad como en la zona de transición y en la porosidad de la pasta de cemento hidratado y de la agregación, predomina la zona de acceso de los agentes agresivos. Por tanto, cuando hay una sustitución de más de un 50% del árido por árido reciclado, la carbonatación que presentaba el hormigón a los 6 meses de curado, tiene una profundidad de carbonatación en los hormigones reciclados del orden de 1.3 a 2.5 veces superior que el hormigón convencional de referencia. Este aumento en la profundidad de la carbonatación se puede atribuir a una mayor permeabilidad de los hormigones reciclados [33, 34].



Figuras 11: Evolución de la carbonatación, 100% RCA: a) 7 días b) 14 días c) 28 días d) 56 días

Si sustituimos el árido fino por árido reciclado de medida fina y, encima, le añadimos cenizas volantes como sustitución parcial del cemento o bien como adición, la profundidad de la carbonatación aumenta en el hormigón reciclado.

2.9.- Hormigón de alta resistencia con árido reciclado

El hormigón de altas prestaciones (HPC) puede ser diseñado para tener unas propiedades mecánicas superiores, una trabajabilidad más alta y más resistencia a los agentes químicos agresivos que el hormigón tradicional [36]. Algunos residuos han sido utilizados con éxito en la fabricación del hormigón convencional y hasta en el HPC. No obstante, solo ha habido algunos intentos de utilizar áridos reciclados de hormigón en la producción de HPC a causa de los aspectos negativos inherentes que presentan los RCA. Pese a ello, es importante la utilización de los áridos reciclados en HPC, ya que el uso de HPC es cada vez más extensa en todo el mundo. La utilización de áridos reciclados podría dirigir la industria del hormigón hacia una situación mucho más cercana al desarrollo sostenible.

La idoneidad de los áridos reciclados de hormigón (RCA) para su uso en diversas aplicaciones con un grado de requisitos moderado, es decir, pavimentos, hormigones de limpieza o refuerzos y recubrimientos, ha estado ampliamente examinado y demostrado por numerosos autores [9, 10]. Se han establecido métodos de dosificación y porcentajes de sustitución del árido natural teniendo en cuenta las propiedades de los áridos reciclados del hormigón en la producción para que el hormigón reciclado convencional presente propiedades adecuadas en estado fresco y sea capaz de desarrollar propiedades mecánicas una vez endurecido, comparables a las del hormigón fabricado con áridos naturales. Algunos trabajos sobre RCA sugieren que el uso de RCA grueso se podría extender al hormigón de alta resistencia (HPC), ofreciendo así un valor añadido al material reciclado de hormigón para su futura venta.

El estudio de Acker [37] que valoraba la resistencia a compresión del hormigón de altas prestaciones con unos contenidos de RCA grueso de 5, 10 y 12.5% indicó que la resistencia con una determinada relación agua/cemento (w/c) era similar a la de los hormigones que contenían áridos naturales.

En la línea de las anteriores investigaciones, el artículo de Limbachiya [38] examinaba la influencia de los RCA gruesos en el hormigón de alta resistencia, 50MPa o más, el rendimiento del hormigón y, a la vez también abordaba cuestiones prácticas y de durabilidad relacionadas con su uso. Se demostró la idoneidad del RCA para su uso en la producción de hormigón de alta resistencia. Los resultados mostraban que, hasta un 30% de RCA grueso, el hormigón podía ser utilizado en un amplio abanico de aplicaciones de altas prestaciones en la ingeniería y que las propiedades de durabilidad eran similares a las del hormigón convencional con árido natural.

Por otra parte, el objetivo de Ajdukiewicz y Kliszczewicz [39] era aclarar la forma de obtener unas altas prestaciones del hormigón utilizando áridos procedentes de la demolición de

estructuras existentes hechas de hormigones de resistencia moderada o alta. A la vez analizaron la afectación de las propiedades del hormigón reciclado debido a la introducción de humo de sílice y superplastificantes. El hormigón original contiene una gran cantidad de pasta de cemento que, al ser triturado, se conserva adherida a los áridos y que mantiene algunas propiedades cuando la zona carbonatada no es muy profunda. Esta actividad fue investigada para ser activada con mezclas de cenizas volantes o humo de sílice [23, 26] y colaborar en el ahorro de consumo de cemento.

2.9.1.- Dosificaciones y materiales

Las dosificaciones de hormigón con árido reciclado, sea para resistencias moderadas o altas, es muy similar al procedimiento seguido para el hormigón con árido natural. Tal y como se hace habitualmente con el hormigón reciclado, las correcciones en el contenido del agua son necesarias para obtener una trabajabilidad adecuada en el hormigón reciclado de altas prestaciones, pero los cambios en la proporción de agua/cemento han de ser relativamente pequeños para no afectar a la resistencia [39].

El método utilizado en el estudio de Limbachiya [38] tenía en cuenta el efecto de los RCA en la resistencia del hormigón para, posteriormente, ajustar la relación a/c de las mezclas con una proporción alta de la RCA para mejorar las resistencias. Se trataba de un método simple y que podía ser integrado dentro de los procedimientos de mezcla y diseño de hormigón reciclado según las resistencias finales.

Las relaciones agua/cemento más utilizadas para el hormigón reciclado de altas prestaciones se encuentran situadas en el intervalo 0.29-0.45.

Limbachiya [38] escogió elementos prefabricados de hormigón estructural de rechazo para producir RCA, para su disponibilidad en grandes cantidades y sus propiedades características mecánicas adecuadas para su uso en la producción de hormigón de alta resistencia. Además, estos elementos son netos y libres de impurezas químicas perjudiciales y de otros componentes nocivos. Ajdukiewicz y Kliszczewicz [39] aplicaron áridos finos y gruesos triturados a la fabricación del hormigón, procedentes de hormigones convencionales con resistencias características entre 35-70MPa.

2.9.2.- Propiedades del hormigón fresco

Como se ha comentado en el apartado anterior, el diseño de la mezcla del hormigón reciclado es muy similar al procedimiento para el hormigón con áridos naturales, pero son necesarias leves correcciones en el contenido de agua para obtener una trabajabilidad adecuada. Para obtener resistencias altas, la relación agua/cemento, pese a la corrección, será igualmente baja. Este hecho sumado a la mayor absorción del árido reciclado hará que la trabajabilidad del hormigón sea, en general, seca o plástica [39].

Según Kikuchi y Yasunaga [36], las dosificaciones con áridos reciclados satisfacen los requisitos en cuanto a consistencia y trabajabilidad en comparación HPC, pero después de una hora su trabajabilidad disminuye considerablemente respecto al HPC a causa de la alta capacidad de absorción del árido reciclado.

2.9.3.- Propiedades mecánicas

En este apartado se establecen las propiedades mecánicas de las muestras en base a estudios previos realizados [38]. Se debe tener en cuenta los efectos que los áridos reciclados efectúan sobre dichas muestras.

2.9.3.1.- Resistencia a compresión

El método establecido por Limbachiya [38] demostró que se podía igualar o mejorar la resistencia a compresión del hormigón de altas prestaciones utilizando elevados porcentajes de sustitución de árido reciclado con la disminución de la relación agua/cemento efectiva [39]. Pese a todo, indicaba que hasta una sustitución del 30% del RCA grueso y sin modificar el agua no se presentaba ningún efecto sobre la resistencia a compresión y, posteriormente, producía una reducción gradual proporcional al aumento del contenido de RCA. A los 28 días, la resistencia máxima a la que puede llegar el hormigón con un 100% de RCA era inferior a 75MPa mientras que para el hormigón que contenía finos a un 30% de RCA grueso llegaba a los 80MPa.

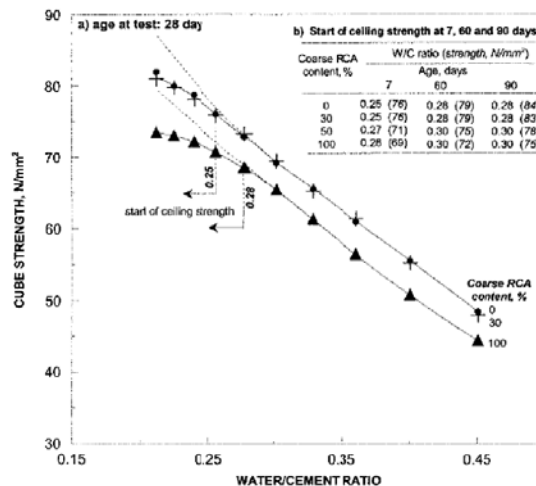


Figura 12: Relación entre resistencia a compresión y relación a/c para sustituciones de 0, 30 y 100% [38]

Ajdukiewicz y Kliszczewicz [39] concluyeron que los áridos reciclados obtenidos a partir del hormigón de resistencia moderada o de alta resistencia con áridos naturales de granito o basalto podían suponer un componente útil para HPC.; añadiendo también que la sustitución de la fracción fina (0/2) por arena natural no era desaconsejable. Conseguir una resistencia característica a compresión de más de 80MPa con árido reciclado de hormigón original de alrededor de 60MPa, utilizando un contenido razonable de aditivos y adiciones de humo de sílice, es factible y la diferencia con las resistencias del hormigón convencional son mínimas [39].

Por otra parte, otros autores afirman haber observado una reducción del 20-30% en la resistencia a compresión en comparación con el hormigón de altas prestaciones [36]. Pese a la disminución aseguran que si se consiguen propiedades adecuadas de durabilidad el hormigón reciclado de altas prestaciones podría cumplir con solvencia su servicio en las aplicaciones prácticas.

2.9.3.2.- Resistencia a tracción indirecta y modulo elástico

Las resistencias a tracción de las mezclas con áridos naturales son siempre más altas pero las diferencias no son superiores al 10% a los 28 días de edad. A su vez, la influencia de los aditivos y las adiciones en la resistencia a tracción es mucho más grande que la influencia en la resistencia a compresión cuando se introducen áridos reciclados [39].

Mientras que algunos autores [38] afirman que el módulo de elasticidad era similar para hormigones con RCA o con NA. Otros [39] aseguran que el modulo elástico era ligeramente menor en el hormigón reciclado.

2.9.3.3.- Retracción y fluencia

La retracción y la fluencia en hormigones de alta resistencia han resultado ser temas de extenso debate, es por este motivo que debido a la mayor capacidad de absorción de los áridos reciclados, los estudios de hormigón reciclado de altas prestaciones presentan generalmente evaluaciones de fluencia y retracción. Su posible uso en algunos elementos de hormigón estructural propenso a deformaciones requiere algunas consideraciones especiales respecto a estas propiedades.

Generalmente, la fluencia y la retracción incrementan a la vez que aumentan la sustitución del árido natural del hormigón [38]. Esto es debido tanto a la mayor proporción de cemento en el hormigón RCA y de la baja relación w/c de la mezcla como de la presencia de mortero adherido al árido natural. Limbachiya [38] observó que el efecto de la retracción era más acentuado en su trabajo ya que aumentaba el contenido del cemento para conseguir iguales resistencias a 28 días.

2.9.3.4.- Adherencia

Ajdukiewicz y Kliszczewicz [39] midieron los valores de adherencia más bajos para hormigón reciclado. Para hormigón con árido reciclado grueso, el descenso medio fue de hasta un 20% mientras que en el caso de sustituir la arena natural por árido fino, fue solo de hasta un 8%.

2.9.4.- Propiedades de durabilidad

Los resultados de las propiedades relacionadas con la durabilidad, incluyendo velocidad de absorción, penetración de cloruros, corrosión inducida por cloruros, hielo-deshielo y resistencia a la abrasión, mostraban un rendimiento satisfactorio con independencia del contenido de RCA grueso para mezclas donde la resistencia de diseño era similar. Los datos obtenidos han de motivar a los ingenieros a adoptar un ambiente más relajado y una actitud más racional hacia el uso de la RCA en la producción del hormigón.

Diversos autores [38, 40] coinciden en el buen comportamiento del árido reciclado por lo que respecta al hielo-deshielo. En todos los porcentajes de sustitución de árido natural por árido reciclado se constata un comportamiento muy bueno del hormigón de alta resistencia resultante, por encima del límite del 90% del factor de durabilidad establecido.

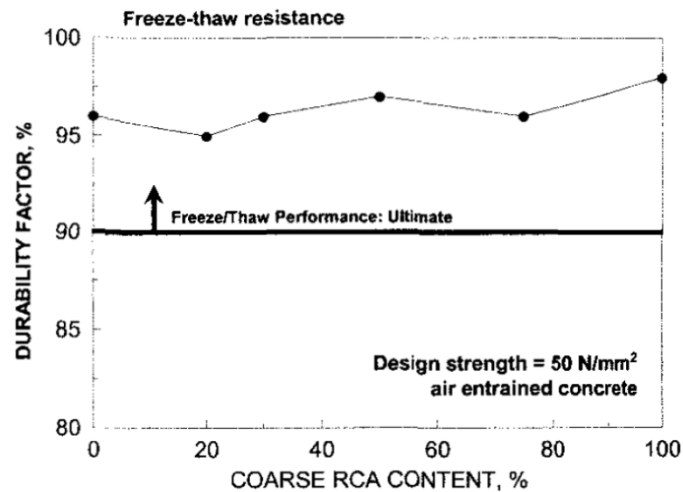


Figura 13: Relación entre el factor de durabilidad por hielo-deshielo respecto al porcentaje de sustitución [38]

Limbachiya [38] sugiere que el RCA grueso, que se obtiene a partir de elementos prefabricados de rechazos, pueda ser utilizado en los hormigones de alto rendimiento. No obstante, el RCA derivado de fuentes diferentes ha de ser evaluado individualmente. Además, es importante demostrar que estos materiales pueden ser utilizados con éxito en la práctica bajo una amplia gama de condiciones de exposición.

2.10.- Curado del hormigón

El curado es el proceso por el cual se busca mantener saturado el hormigón hasta que los espacios de cemento fresco, originalmente llenos de agua sean reemplazados por los productos de la hidratación del cemento. El curado pretende controlar el movimiento de temperatura y humedad hacia dentro y hacia afuera del hormigón. Busca también, evitar la contracción de fraguado hasta que el hormigón alcance una resistencia mínima que le permita soportar los esfuerzos inducidos por ésta. La falta de curado del hormigón reduce drásticamente su resistencia.

Existen diversos métodos de curado: curado con agua, con materiales sellantes y curado al vapor. El primero puede ser de cuatro tipos: por inmersión, haciendo uso de rociadores, utilizando coberturas húmedas y utilizando tierra, arena o serrín sobre el hormigón.

2.10.1.- Curado al vapor

Uno de los métodos más eficaces para el curado del hormigón es el empleo de vapor, que acelera considerablemente el endurecimiento. Por su propia naturaleza, el curado al vapor se utiliza casi exclusivamente en prefabricación.

En el curado al vapor (y, en general, en cualquier curado por calor húmedo) interviene el concepto de maduración del hormigón, que es el producto de la temperatura, en grados centígrados, a que se somete la pieza por el tiempo de actuación de la misma, si ésta es constante; o la integral de la curva temperatura-tiempo, en el caso de temperatura variable.

Se admite hoy día que, para un mismo hormigón y dentro de ciertos límites, la eficacia del curado es la misma si la maduración es también la misma. Es decir, que distintas combinaciones de temperaturas y tiempos conducen al mismo resultado siempre que su producto (o la suma de productos) sea constante.

2.10.1.1.- Hormigón convencional

El proceso de curado al vapor se inicia, una vez transcurrido el prefraguado, elevándose gradualmente la temperatura hasta alcanzar la temperatura límite. Esta se mantiene durante un cierto plazo, al cabo del cual se hace descender de forma continua hasta igualar la temperatura ambiente, importante evitar que el hormigón experimente choques térmicos durante el proceso.

Cada cemento tiene una curva de curado ideal, que puede determinarse experimentalmente para conocer las velocidades óptimas de variación de temperatura, el valor de temperatura límite y el tiempo de permanencia en la misma. En general, la duración del prefraguado oscila entre dos y cinco horas; la velocidad de calentamiento y enfriamiento no debe exceder de 20°C por hora; y la temperatura límite óptima está comprendida entre 55 °C y 75°C, sin que deban exceder los 80°C [40].

La presión del vapor debe mantenerse lo más uniforme posible a lo largo de la pieza, conservando el recinto de curado, en todo momento, saturado de humedad.

2.10.1.2.- Hormigones reciclados

Actualmente, el curado al vapor inicial a presión atmosférica se está usando cada vez con más frecuencia en los elementos de prefabricados, como por ejemplo en los segmentos de prefabricados para túneles, donde es necesaria cierta velocidad en la eficiencia de la producción. Los parámetros típicos de este proceso de curado al vapor son: tiempo de precurado, máxima temperatura del vapor y duración a la máxima temperatura. Está confirmado que el curado al vapor a baja temperatura podría mejorar la calidad de los hormigones de altas prestaciones con incorporación de hormigones reciclados, comparado con el curado estándar.

Diversos estudios muestran que las resistencias a tracción y compresión del hormigón disminuyen con el aumento en el contenido de agregados reciclados pero que se obtienen mejoras considerables en las resistencias a edades tempranas si el curado se efectúa en cámara de vapor. Esto es debido a una mayor hidratación del hormigón [40].

En lo que respecta a la hidratación del hormigón y a la relación a/c de éste, Poon, Kou y Chan destacan las ventajas en el aumento de las resistencias a compresión en periodos tempranos (1 y 7 días) de los hormigones con áridos reciclados curados al vapor frente a otros tipos de curado. Los resultados son aún mejores para bajas relaciones de a/c [43]:

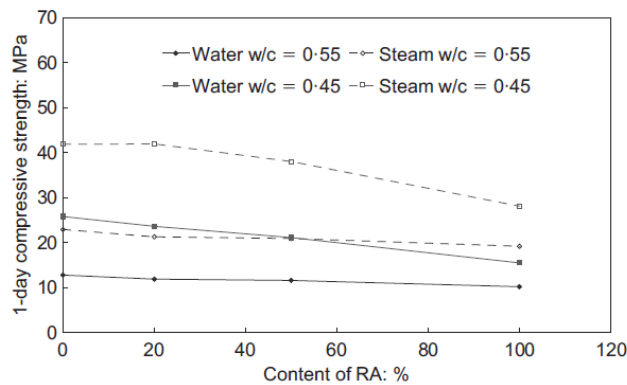


Figura 14: Resistencia a compresión 1 día

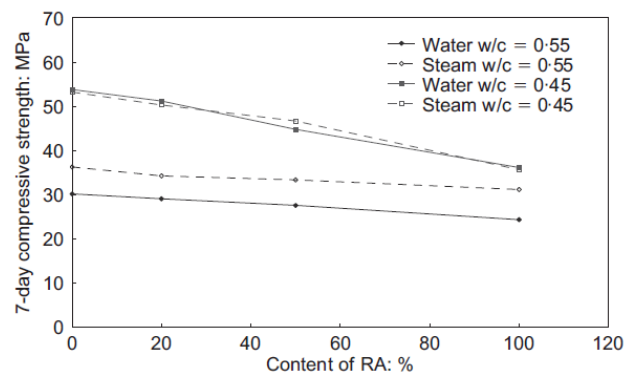


Figura 15: Resistencia a compresión 7 días

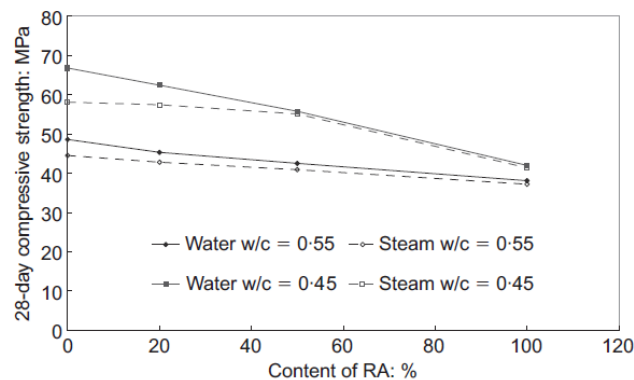


Figura 16: Resistencia a compresión 28 días

En el caso del hormigón con una baja relación a/c y un alto porcentaje de sustitución de áridos naturales por áridos reciclados, los cambios en las resistencias son más complejos debido a los efectos físico-químicos de las puzolanas que puedan existir en el hormigón, como es en el caso de estudio del presente proyecto. La influencia física en el refinamiento del grosor de la estructura del poro mientras que la fase química consiste en las reacciones puzolánicas y el proceso de hidratación. Se ha establecido que la temperatura máxima óptima debe estar cerca de los 60°C, considerando que el incremento del tiempo de pre-curado incrementa la resistencia del hormigón [44].

Anteriores estudios muestran los efectos del curado al vapor a una temperatura de 50°C con una baja relación de agua/cemento:

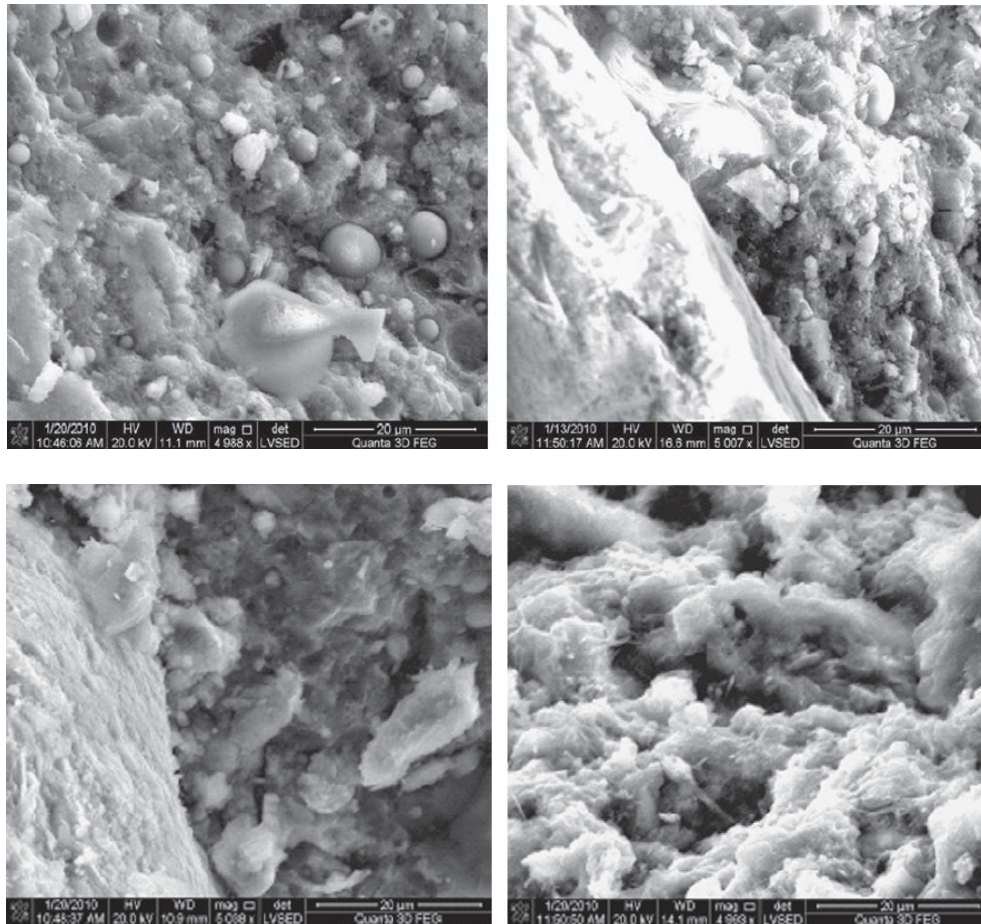


Figura 17: Fotos de SEM (scanning electron microscope) de cementos endurecidos bajo diferentes periodos de curado al vapor: (a) 0-h de duración del curado al vapor a 50°C; (b) 5-h de duración del curado al vapor a 50°C; (c) 14-h de duración del curado al vapor a 50°C; (d) 24-h de duración del curado al vapor a 50°C.

La relación entre la distribución del tamaño de poros y la Resistencia a compresión puede ser expresada mediante una formula empírica:

$$\phi = \frac{f_c}{f_{c0}} = 10^{-\gamma_B \alpha_{FB}}$$

Dónde:

- Φ - resistencia relativa de compresión (%)
- f_c - resistencia de compresión con poros (MPa)
- f_{c0} - resistencia de compresión sin poros (MPa)
- α_{FB} - aire contenido en el cemento (vol %)
- γ_B - parámetro dependiente del material

En varios ensayos realizados por Ming et al se midió la distribución y los cambios en la estructura de los poros de los hormigones curados mediante vapor, dando como resultado las imágenes de la figura anterior.

En conclusión se puede decir que el curado al vapor lleva a ciertos cambios en la porosidad y en la distribución de los poros que puede ser atribuido al incremento de la hidratación de las cenizas volantes y del cemento. La variación en estos contribuye a un incremento significativo en las resistencias a compresión. Sin embargo, la excesiva prolongación del curado a vapor puede tener un efecto negativo, llegando a incrementar el tamaño de los poros y disminuyendo las resistencias de las muestras. Se deben establecer unos ciclos de curado muy bien definidos.

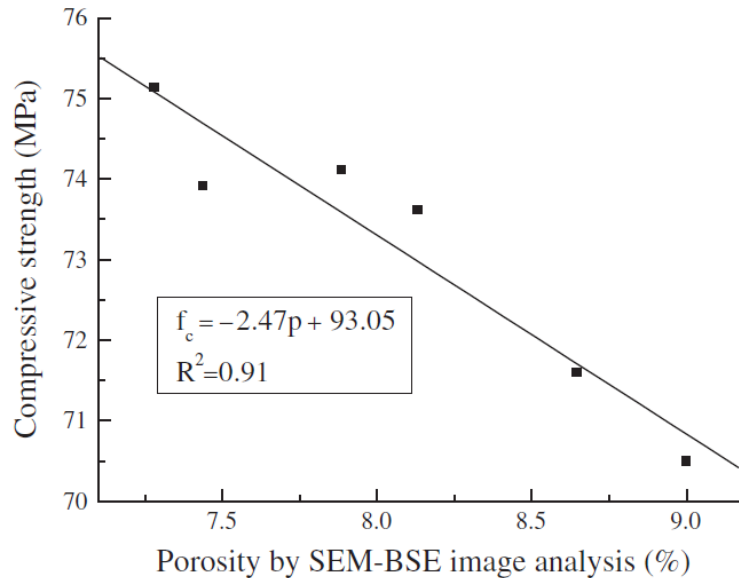


Figura 18: Relación entre índice de poros y resistencia a compresión

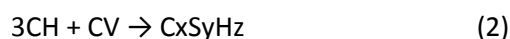
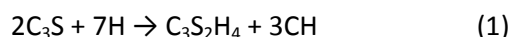
2.11.- Adiciones de cenizas volantes

Las cenizas volantes son un subproducto industrial con una continua tendencia al alza. De este residuo, 210 kt se produjeron en 2010 solamente en España y de todo el excedente de cenizas volantes, solamente se usa aproximadamente el 10 %, acumulándose las restantes en grandes cantidades en espacios aprovechables para otros usos [41].

Su principal utilidad, en el campo de la construcción, es en calidad de adición al hormigón como sustituto del cemento. Este uso está limitado por la Normativa internacional a un tamaño máximo, expresado en un determinado % retenido en el tamiz de $45 \mu m$. Esta limitación se justifica, a haberse encontrado una relación entre este porcentaje y la resistencia a compresión alcanzada por el hormigón, en especial a edades tempranas. Esta situación, impone el estudio de la posible utilización de las cenizas volantes consideradas no aptas para sustituir al cemento, para otros fines, y en otros sectores de la industria de la construcción, como la cerámica y la prefabricación de piezas de hormigón. Estas industrias desarrollan unos procesos de fabricación que favorecerían su aplicación. En este sentido, en el proceso de prefabricación de piezas de hormigón es práctica usual el sometimiento de la pieza a curados con incorporación de calor, al objeto de conseguir a edades tempranas las resistencias necesarias para la manipulación de las piezas. Esto puede resultar beneficioso para la mejora de resistencias a cortas edades en hormigones con incorporación de cenizas volantes. De esta manera, al mismo tiempo que se profundiza en el estudio de un sistema constructivo, que debido a sus reconocidas ventajas: resistencia, facilidad de fabricación, versatilidad, etc, se muestra apropiado para ciertas construcciones (prefabricados, viviendas bajas,...), se

contribuye a la solución del problema ecológico que supone el almacenamiento de este subproducto industrial.

En los hormigones con adición de cenizas volantes ocurren dos reacciones principales. En la primera se produce gel C-S-H ($C_3S_2H_4$) y portlandita (hidróxido cálcico) por la hidratación del cemento Pórtland, ecuación (1). En la segunda, la portlandita se combina con las cenizas volantes (CV) para formar nuevos geles de C-S-H, ecuación (2). El resultado suele traducirse en un hormigón de mejores propiedades físicas y mecánicas.



En la actualidad la incorporación de cenizas está condicionada por el tipo de cemento disponible en el mercado, en vez de condicionar el tipo de cemento a las cenizas disponibles. Esto resulta en especificaciones diseñadas para que las cenizas se ajusten a los cementos que están disponibles en el mercado. Para explotar adecuadamente las cenizas volantes que provee la industria, el cemento debería ser formulado para optimizar la actuación de la combinación en términos de consistencia, resistencia y durabilidad de los hormigones.

De experimentos ya realizados se ha podido llegar a la conclusión de que las cenizas volantes pueden contribuir a mejorar la resistencia a compresión a edades tan tempranas como los 28 días [42].

La eficacia de la adición de ceniza frente a la penetración de carbonatos depende del contenido libre de portlandita. Siendo más efectiva la adición cuanto mayor sea el contenido de portlandita libre. Asimismo, la penetración del ion cloruro se reduce por el uso de cenizas volantes. La eficacia de la ceniza frente al avance de cloruros está asociada a las reducciones de porosidad producidas por la adición [42].

El comportamiento de los hormigones con cenizas volantes varía en función de las características físicas y químicas de los cementos empleados, a pesar de que éstos estén catalogados bajo la misma designación de cementos comunes [42].

En las últimas investigaciones Kou y Poon [45], debido a la reacción puzolánica entre cenizas volantes y $CaOH_2$ en los áridos reciclados, las propiedades mecánicas y la durabilidad a largo plazo mejoran significativamente.

2.11.1 Cenizas volantes y curadas al vapor

El proceso de endurecimiento y el incremento de resistencia del hormigón bajo condiciones normales son lentos; esto afecta a la tasa de producción de las plantas de hormigón. Además, es beneficioso proveer un buen nivel de resistencia para el hormigón en un corto periodo de tiempo acelerando su proceso de endurecimiento usando varios métodos. El tratamiento mediante calor es uno entre muchos métodos usados para este propósito.

En la última década se han publicado muchos estudios acerca de la reactividad de las cenizas volantes mediante activadores químicos ($CaSO_4$, Na_2SO_4 , $CaCl_2$,...). El uso de la ceniza volante junto con cemento Portland causa una reacción en la interfase cristalina entre la ceniza y el hidróxido de calcio generado de la hidratación del cemento Portland, lo que lleva a la

formación adicional de gel C-S-H y resulta en una mayor densidad y resistencia. El hormigón con cenizas presenta una buena adaptabilidad al curado al vapor; temperaturas de curado por encima de los 20 °C mejoran la resistencia del mortero de cemento con contenidos de un 20% de ceniza volante. Otros estudios indican que el incremento de la temperatura de curado va en mucho menos detrimento para las mezclas con cenizas volantes. Así mismo, se ha demostrado que para pastas de cemento convencionales de igual relación a/c, con un grado de hidratación similar, cuanto más temperatura mayor es la porosidad total obtenida [46].

La fuerza de compresión del hormigón que contiene cenizas volantes con curado al vapor después de desmoldar es baja y a 28 días sigue siendo baja, lo que indica que la adaptabilidad de las cenizas al curado al vapor es pobre.

Por lo que respecta a las temperaturas empleadas para los hormigones con cenizas volantes, si estas son muy altas se considera un desperdicio de energía y pueden tener efectos negativos en las propiedades mecánicas de los cementos (tanto los convencionales como los hormigones con áridos reciclados) [47].

2.11.2.- Cenizas volantes y hormigones reciclados

La adición de cenizas volantes a hormigones con áridos reciclados tiene una serie de efectos que deben ser considerados. Uno de ellos es la disminución de las resistencias a compresión a medida que se incrementa el porcentaje de reemplazo con áridos reciclados. Según estudios anteriores, a un 100% de reemplazo la resistencia de las probetas decrece alrededor de un 33% a 28 días [49].

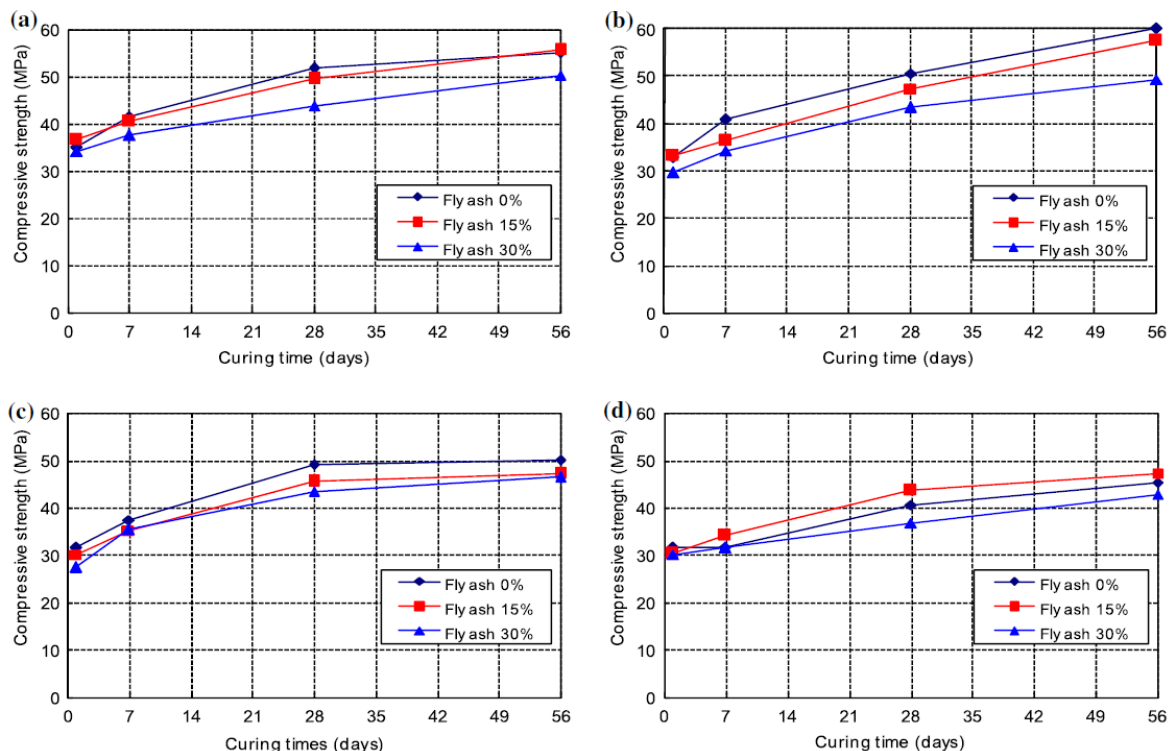


Figura 19: Resistencia a compresión de hormigones con un tanto por ciento de sustitución de áridos reciclados de: (a) 0% (b) 30% (c) 60% (d) 100%

Asimismo, los hormigones con áridos reciclados han demostrado tener suficiente resistencia a la penetración de cloruros como para tener aplicaciones de carácter estructural. Estas resistencias se reducen aún más con la adición de cenizas volantes [48].

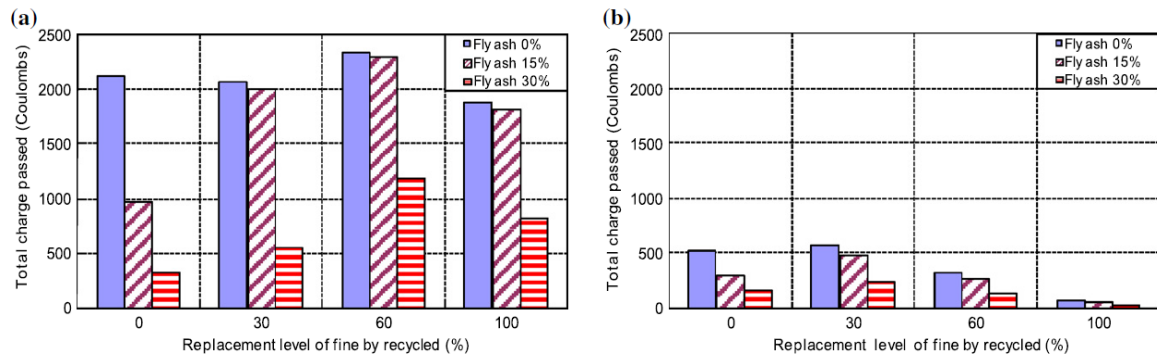


Figura 20: Resistencia a la penetrabilidad del ion cloruro a lo largo del tiempo con diferentes proporciones de cenizas volantes; (a) 21 días (b) 56 días

Las medidas de carbonatación en anteriores estudios también son altamente satisfactorias, cumpliendo siempre los mínimos según la norma establecida.

3.- Materiales

3.1.- Introducción

En este apartado se explicará el proceso realizado para la fabricación del hormigón reciclado para los diferentes tipos de hormigón reciclado y los diferentes porcentajes de sustitución del árido y la adición de la ceniza volante.

Inicialmente se caracterizaron los materiales utilizados en la fabricación de los diferentes tipos de hormigones para poder conocer las características de los materiales de los que se disponía para trabajar.

Una vez realizada la caracterización de los materiales, empezó la fase de fabricación del hormigón. En la fabricación se realizaron diferentes dosificaciones manteniendo los porcentajes de cemento y de agua pero modificando los porcentajes de árido natural a sustituir por el árido reciclado e introduciendo la ceniza volante en algunos casos. Los porcentajes de sustitución del árido reciclado son del 50% y del 100% por los diferentes orígenes del árido reciclado 40MPa, 60MPa y 100MPa.

Los ensayos se realizaron a medida que se fabricaba el hormigón, se estudiaron las diferentes propiedades mecánicas de las probetas a 7, 28 y 90 días, como es el caso del estudio del comportamiento de la resistencia a compresión, tracción indirecta y módulo elástico. A los 28 días también se estudiaron otras propiedades físicas como la densidad, absorción, porcentaje de poros permeables y UPV, y propiedades de durabilidad del hormigón reciclado como succión capilar de agua, resistencia al ataque de cloruros y resistividad eléctrica.

En la fase de fabricación, Fase 1, se fijó una relación de agua/cemento efectiva a partir del hormigón convencional. Se realizaron las siguientes fabricaciones: hormigón convencional, hormigón con sustitución del árido natural por el árido reciclado, 40MPa de 50 y 100%, 60MPa de 50 y 100% y 100MPa de 50 y 100%, realizando dos series de cada fabricación, una serie con adicción de cenizas volantes y la otra sin adicción de ceniza volante, todas la probetas curadas en la cámara húmeda.

Se realizó la segunda fase, Fase 2, donde se fabricaron hormigón convencional, hormigón con sustitución de árido natural por el árido reciclado 40MPa de 50 y 100%, 60MPa de 50 y 100% y 100MPa de 50 y 100%, realizando dos series de cada fabricación, una serie con adicción de cenizas volantes y la otra sin adicción de cenizas volantes, pero en este caso todas fueron curadas en la cámara de vapor que es lo que las diferencian de la fase anterior.

En estas fases los áridos reciclados se encontraban saturados para poder obtener la resistencia esperada a las 24 horas.

3.2.- Caracterización de los materiales

Las propiedades de los distintos componentes del hormigón, además de las dosificaciones y el método de fabricación, son clave para determinar las propiedades que tendrá este. A continuación se muestran las características más importantes de los materiales que se utilizaron durante el proceso de fabricación.

3.2.1.- Cemento

En todas las fases de la fabricación se utilizó el mismo cemento CEM I 52.5 R, cemento Portland de clase resistente 52.2, alta resistencia inicial, las propiedades de los cuales se detallan en la tabla siguiente:

Tabla 3: Composición química del cemento

| Composición (%) | CEM I 52.5 R |
|--------------------------------|--------------|
| SiO ₂ | 21.205 |
| Fe ₂ O ₃ | 2.765 |
| Al ₂ O ₃ | 4.41 |
| CaO | 65.34 |
| MgO | 1.525 |
| K ₂ O | 0.71 |
| Na ₂ O | 0.2 |
| P_Fuego | 0.27 |
| MnO | 0.045 |
| TiO ₂ | 0.19 |

Tabla 4: Propiedades del cemento CEM I 52.5 R

| | Especificación | Valor medio |
|-------------------------------|----------------|-------------|
| Clínker (%) | - | 98 |
| Componentes minoritarios (%) | - | 2 |
| Perdida al fuego (%) | < 5 | 0.9 |
| Residuo insoluble (%) | < 5 | 0.5 |
| Cloruros, Cl (%) | < 0.1 | 0.01 |
| Sulfatos, SO ₃ (%) | < 4 | 2.67 |
| Alcalinos (%) | - | 0.5 |
| Expansión (mm) | < 10 | 0.7 |

3.2.2.- Áridos

Los áridos utilizados en los procesos de fabricación del hormigón reciclado fueron los siguientes:

Áridos naturales:

Grava: de río natural 4/11 mm y triturada natural 4/10 mm

Arena: arena natural del 0/2 mm y 0/4 mm, los dos procedentes de arena de río.

Áridos reciclados:

Estos áridos fueron triturados para poder obtener la fracción 4/10 que fue utilizada para la fabricación, en sustitución del árido grueso. Estas muestras fueron trituradas por varias máquinas para poder obtener esta fracción: se ha utilizado la machacadora de la UPC del laboratorio del Departamento de materiales de construcción y la machacadora pequeña de la UB, de la Facultad de Geología. Una vez trituradas las muestras, el siguiente paso fue cribar la

muestra por los tamices de 10 mm con la fracción más grande y la fracción de 4 mm con la más pequeña.

Árido grueso: Grava con resistencia de 40MPa, Grava con resistencia de 60MPa y Grava con resistencia de 100MPa.

3.2.2.1.- Granulometría de los áridos naturales y de los áridos reciclables

La norma UNE EN 933-1:1998 especifica las medidas nominales y la forma de las oberturas de los tamices utilizados para determinar la medida de las partículas de los áridos ensayados. Para la determinación de la granulometría de los áridos se utilizaron los tamices. En el caso de gravas: 12.5, 10, 8, 6.3, 5, 4, 2 y para las arenas los tamices utilizados fueron: 5, 4, 2, 1, 0.5, 0.25, 0.125 y 0.063.

Áridos naturales:

La granulometría obtenida para la grava natural triturada (4/10mm) y de río (4/11mm) fue la siguiente:

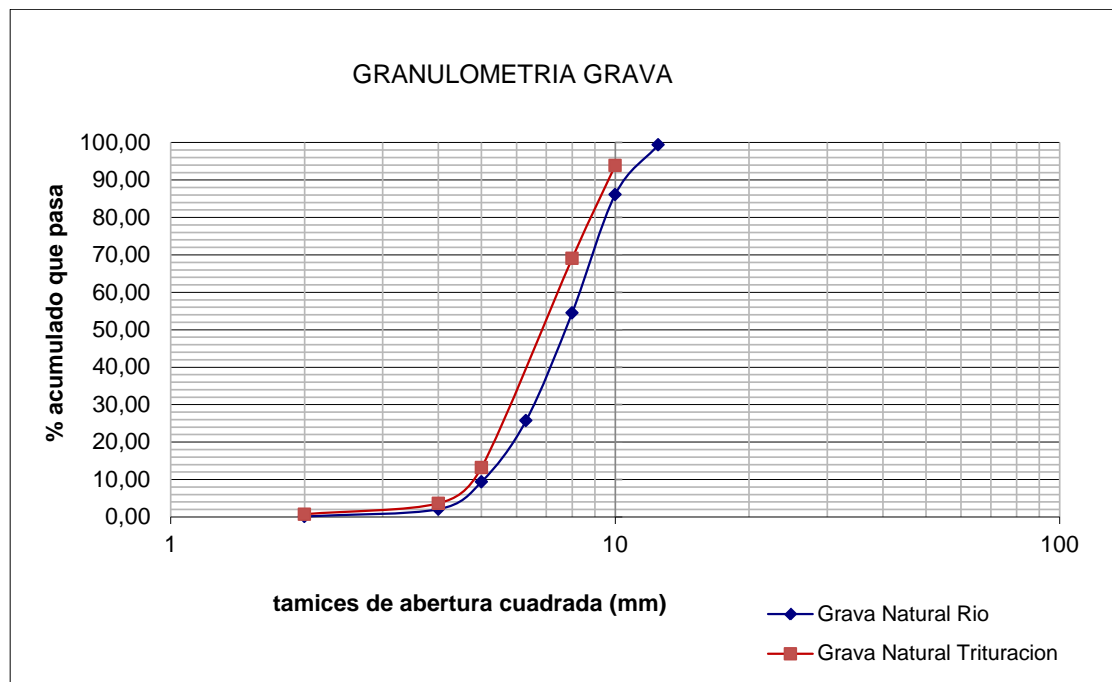


Figura 21: Granulometría de las gravas naturales

Para el caso de las arenas, las granulometrías obtenidas para la arena natural (0/2 mm) y arena natural (0/4mm):

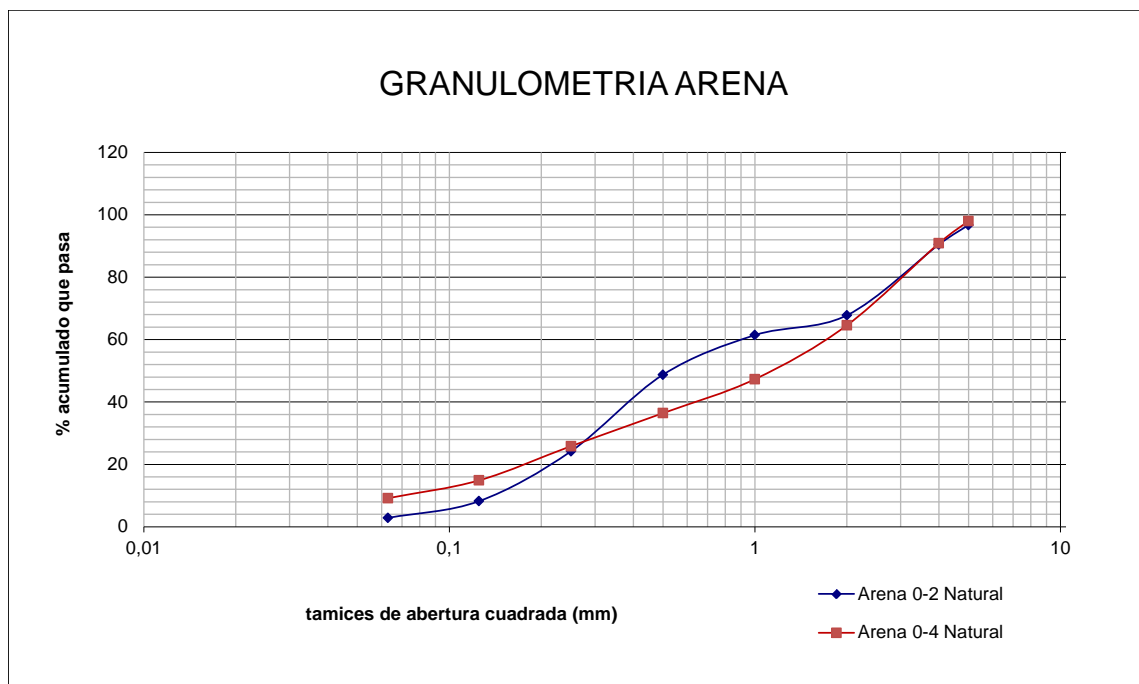


Figura 22: Granulometría arena natural

Áridos reciclados:

Los áridos reciclados gruesos previamente fueron cribados para quedarnos con la fracción de 10 mm a 4 mm.

La granulometría obtenida por los áridos reciclados de 40MPa (4/10 mm), 60MPa (4/10 mm) y 100MPa (4/10 mm), son las siguientes:

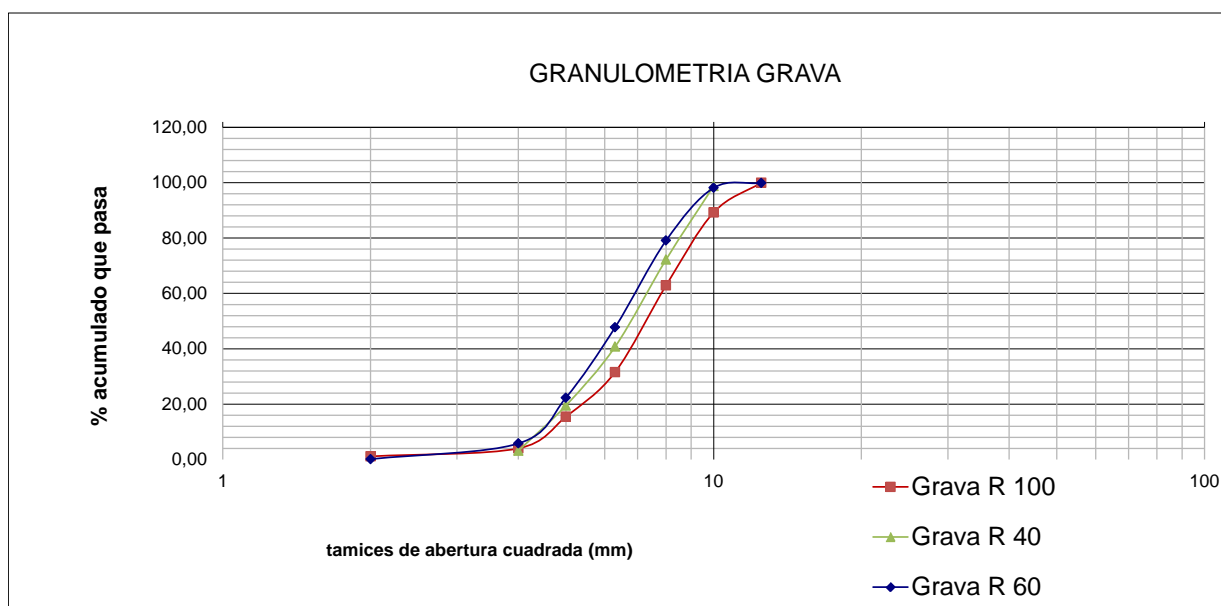


Figura 23: Granulometría de los áridos reciclados

Se puede determinar que los áridos reciclados presentan una granulometría totalmente adecuada ya que los porcentajes obtenidos son semejantes para el caso de los áridos naturales, ahora bien, estos presentan menos densidad y más capacidad de absorción del agua. Esto puede causar que no sea fácil controlar tanto la trabajabilidad como la relación agua/cemento en el hormigón, estos áridos presentan un desgaste similar al de los áridos naturales.

3.2.2.2.- Densidad de las partículas, absorción del agua

Para la realización del ensayo de la densidad se siguió la normativa UNE-EN 1097-6:2001, se utilizó el método del picnómetro.

El método consiste en cribar el material por un tamiz de 0.063 mm para la eliminación de la cantidad de finos que hay en la muestra y luego saturar la muestra, sumergiéndola en el agua durante 24 horas. Seguidamente se seca la muestra con una toalla para poder sacar la humedad superficial del árido, y entonces se pesa la muestra.

Una vez se tiene la muestra saturada con la superficie seca y pesada, se introduce en el picnómetro, donde se procede a pesarlo en el mismo, con agua. Cuando tenemos el peso del picnómetro más la muestra, se vacía el picnómetro y se coloca la muestra en una bandeja para proceder al secado de la estufa a 105°C durante 24 horas, y finalmente se obtiene el peso seco de la muestra.

$$\text{Densidad aparente de las partículas (D.a.) } \rho_a = \rho_w \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)}$$

$$\text{Densidad de las partículas después del secado en la estufa (D.s) } \rho_{rd} = \rho_w \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)}$$

$$\text{Densidad de las partículas saturadas con la superficie seca (D.s.s.s) } \rho_{ssd} = \rho_w \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)}$$

$$\text{Absorción de agua } WA_{24h} = \frac{100 \cdot (M_1 - M_4)}{M_4}$$

Donde;

M_1 - masa del árido saturado y con la superficie seca, pesada en el aire.

M_2 - masa del picnómetro que contiene la muestra de árido saturado.

M_3 - masa del picnómetro lleno de agua únicamente.

M_4 - masa de la muestra a ensayar seca de la estufa y pesada en el aire.

Tabla 5: Densidades

| | Arena 0-2 | Arena 0-4 | Grava N Rio | Grava N Triturada | Grava R 40 MPa | Grava R 60MPa | Grava R 100MPa |
|--------------|--------------|--------------|----------------|----------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| ρ_a | 2.57 | 2.7 | 2.71 | 2.84 | 2.66 | 2.70 | 2.73 |
| ρ_{rd} | 2.5 | 2.57 | 2.61 | 2.68 | 2.30 | 2.39 | 2.47 |
| ρ_{ssd} | 2.53 | 2.62 | 2.65 | 2.74 | 2.44 | 2.51 | 2.57 |
| WA_{24h} | 1.02 | 1.93 | 1.29 | 2.13 | 5.91 | 4.90 | 3.74 |

3.2.2.3.- Coeficiente de los Angeles

El objetivo del coeficiente de los Angeles o bien el desgaste L.A., es determina su resistencia a la fragmentación por el choque de los áridos gruesos. Se determina de acuerdo con la normativa UNE EN 1097-2.

El procedimiento del ensayo consiste en hacer pasar el material que necesita para hacer el ensayo, por los tamices 10 mm, 6.3 mm y 5 mm, y se elimina el material que queda retenido por el tamiz 10 mm y el que pasa por el tamiz 5 mm. Se introduce la cantidad del árido restante en una estufa a $110 \pm 5^\circ\text{C}$.

El material reciclado se somete al ensayo de los Angeles, se hace girar el tambor que contiene 8 bolas de acero de 400 y 445g y se gira el tambor 500 vueltas a una velocidad de $32 \pm 1\text{rpm}$.

Pasamos los materiales resultantes del ensayo por el tamiz de 1.6 mm, utilizando agua para limpiar los áridos finos y de esta manera retiramos todo el material inferior a 1.6 mm. El material retenido por el tamiz 1.6 mm se seca en la estufa a $110 \pm 5^\circ\text{C}$ hasta llegar a masa constante y obtenemos el peso de este y procedemos a hacer el cálculo del coeficiente de los Angeles.

$$L.A = \frac{5000 - M}{5000} \cdot 100$$

Tabla 6: Coeficiente de los Angeles

| INDICE DE LOS ANGELES | Grava N Rio | Grava N Triturada | Grava R 40MPa | Grava R 60MPa | Grava R Traviesas 100MPa |
|-----------------------|-------------|-------------------|---------------|---------------|--------------------------|
| LA | 19,61 | 24,77 | 24,31 | 25,24 | 24,01 |

3.2.2.4.- Índice de lajas

Se determina según la normativa UNE 933-3, este ensayo nos indica la relación entre el peso de las partículas en forma de laja respecto el peso total, donde se mira según las diferentes franjas granulométricas.

Para la realización del ensayo se pasa el árido por el tamiz de 4 mm, se elimina la fracción fina, la fracción del árido que queda retenida se introduce en la estufa a 105°C durante 24 horas.

Se separan las muestras según la obertura del tamiz 25, 20, 16, 12.5, 10, 8, 6.3, 5 y 4 mm, a continuación se pesan cada una de las diferentes fracciones retenidas entre los tamices D_i/d_i , después se pasa por el tamiz de barra $D_i/2$ y se pesa cada una de las fracciones.

$$I.L = \frac{\sum M_{i2}}{\sum M_{i1}} \cdot 100$$

Donde, $\sum M_{i1}$ es la suma de las masas de las fracciones granulométricas d_i/D_i y $\sum M_{i2}$ es la suma de las masas de las partículas que pasan por los tamices de las barras de ancho $D_i/2$ correspondientes a cada fracción granulométrica.

Tabla 7: Índice de lajas

| INDICE DE LAJAS | Grava Rio | Grava Triturado | Grava 40MPa | Grava 60MPa | Grava 100MPa |
|-----------------|-----------|-----------------|-------------|-------------|--------------|
| IL | 17,71 | 7,81 | 9,59 | 13,57 | 16,53 |

3.2.3.- Cenizas Volantes

En la mitad de las probetas de cada fase, se utilizó cenizas volantes como aditivo, las propiedades de los cuales se detallan en la tabla siguiente:

Tabla 8: Composición química de la ceniza volante

| Composición (%) | Ceniza volante |
|--------------------------------|----------------|
| SiO ₂ | 55.455 |
| Fe ₂ O ₃ | 5.86 |
| Al ₂ O ₃ | 26.936 |
| CaO | 5.7 |
| MgO | 1.5 |
| K ₂ O | 1.505 |
| Na ₂ O | 0.615 |
| P_Fuego | 0.825 |
| MnO | 0.05 |
| TiO ₂ | 1.41 |

3.2.4.- Aditivo

Para la fabricación de los hormigones reciclado se ha utilizado un aditivo del tipos superplastificante de alto rendimiento.

Sika Viscocrete 20HE combina diferentes mecanismos de acción, de absorción a la superficie de los finos, así como su mejor dispersión durante el proceso de hidratación se producen los siguientes efectos:

- Pronunciada aptitud de autocompactación, se utiliza en hormigones autocompactables.
- Reducción muy importante del agua de amasado obteniendo hormigones de alta resistencia i grandes impermeabilidades.
- Altas resistencias iniciales.
- Disminución de la fluencia y la retracción.
- Retardador de los efectos de la carbonatación del hormigón.

Las dosificaciones recomendadas son entre 0.5 y 1.5% del peso del conglomerante. La utilizada habitualmente es de 1.5%.

4.- Metodología y ensayos del hormigón

En este apartado se detallará el proceso de fabricación del hormigón, donde se explicará de forma detallada los diferentes procesos de la fabricación y los ensayos realizados en el laboratorio de forma que queden determinadas las propiedades y sus características.

4.1.- Proceso de fabricación del hormigón

4.1.1.- Fabricación

La fabricación de todos los hormigones se realizó en el laboratorio de Materiales de la Construcción del departamento de Ingeniería de la Construcción de la UPC.

El proceso de fabricación fue el mismo en todos los casos, utilizando una mezcladora de eje vertical: Primero se humidifica el capazo de la mezcladora y se introduce la fracción de árido más grande (árido reciclado, grava natural de río y grava natural de machaqueo) a continuación se introduce el cemento y las cenizas volantes (que dependiendo de la fabricación se añade o no) y se mezcla con una pequeña cantidad de agua. Después se introduce la fracción más fina del árido y se mezcla con agua que se va introduciendo poco a poco para poder llegar a toda la superficie; mientras se va mezclando se introduce también el aditivo con una pequeña proporción de agua. Una vez acabado el primer ciclo de mezcla se vuelve a dar otro ciclo para que todo quede homogeneizado. Se mantiene siempre constante para que no se altere la relación a/c.



Figura 24: Primer ciclo de mezcla

4.1.2.- Dosificación utilizada

La fabricación de los hormigones está dividida en dos fases experimentales, las dosificaciones se realizaron mediante el modelo teórico de Fuller con una relación agua/cemento efectiva de 0,287.

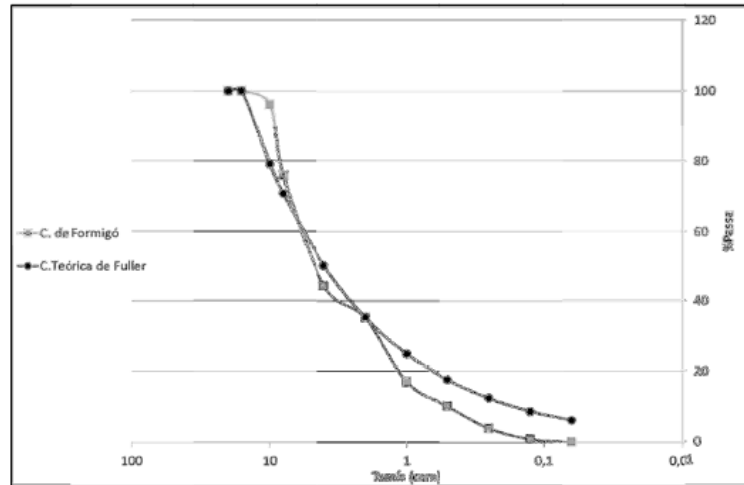


Figura 25: Curva teórica de Fuller

Donde la curva diseñada para la dosificación se adapta con la curva teórica de Fuller, se puede observar que se ajusta el área de la parte de arriba con la de abajo.

En la primera fase, Fase 1, se fijó la relación agua/cemento efectiva de 0.287 en todos los hormigones para poder comparar los resultados obtenidos por los hormigones fabricados con árido reciclados, los tres tipos (procedente de un hormigón de 100MPa, HR100, procedente de un hormigón de 60MPa, HR60, y procedente de un hormigón de 40MPa, HR40) en sustitución del 50% y 100% al árido natural, con respecto al hormigón convencional. Toda la serie se fabricó por un lado utilizando 100% de cemento portland (SC) tipo CEM I 52.5R y por otro 70% de cemento portland y 30% de cenizas volantes (CC). Los hormigones fueron curados en la cámara húmeda.

En la segunda fase, Fase 2, tal y como se puede ver en la tabla 9, se fabricaron la misma cantidad de hormigones, los dos convencionales fabricados uno de ellos con 100% de cemento portland y el otro con un 30% de cenizas volantes en sustitución al cemento. Y por otro lado los hormigones fabricados con los tres tipos de áridos reciclados en sustitución al árido grueso natural en 50% y 100%. Los hormigones reciclados también se fabricaron con los dos tipos de materiales cementicios. Sin embargo en esta fase el curado de los hormigones se realizó en la cámara de vapor.

La nomenclatura utilizada para identificar las tipologías de hormigones fabricados en cada una de las fases experimentales planteadas se puede ver en la tabla 9.

Tabla 9: Nomenclatura de los hormigones

| Tipos de hormigón | Nomenclatura |
|--|--------------|
| Fase 1 (hormigones curados en cámara húmeda) | |
| Hormigón convencional sin cenizas volantes | HC-SC |
| Hormigón convencional con cenizas volantes | HC-CC |
| Hormigón con un 50% de sustitución por áridos de 100 MPa sin cenizas volantes | HR100-50-SC |
| Hormigón con un 50% de sustitución por áridos de 100 MPa con cenizas volantes | HR100-50-CC |
| Hormigón con un 100% de sustitución por áridos de 100 MPa sin cenizas volantes | HR100-100-SC |
| Hormigón con un 100% de sustitución por áridos de 100 MPa con cenizas volantes | HR100-100-CC |
| Hormigón con un 100% de sustitución por áridos de 60 MPa sin cenizas volantes | HR60-100-SC |
| Hormigón con un 100% de sustitución por áridos de 60 MPa con cenizas volantes | HR60-100-CC |

| | |
|--|----------------|
| Hormigón con un 100% de sustitución por áridos de 60 MPa sin cenizas volantes | HR60-100-SC |
| Hormigón con un 100% de sustitución por áridos de 60 MPa con cenizas volantes | HR60-100-CC |
| Hormigón con un 50% de sustitución por áridos de 40 MPa sin cenizas volantes | HR40-50-SC |
| Hormigón con un 50% de sustitución por áridos de 40 MPa con cenizas volantes | HR40-50-CC |
| Hormigón con un 100% de sustitución por áridos de 40 MPa sin cenizas volantes | HR40-100-SC |
| Hormigón con un 100% de sustitución por áridos de 40 MPa con cenizas volantes | HR40-100-CC |
| FASE 2 (hormigones curado en cámara de vapor) | |
| Hormigón convencional sin cenizas volantes curada al vapor | HC-SC-V |
| Hormigón convencional con cenizas volantes curada al vapor | HC-CC-V |
| Hormigón con un 50% de sustitución por áridos de 100 MPa sin cenizas volantes curado al vapor | HR100-50-SC-V |
| Hormigón con un 50% de sustitución por áridos de 100 MPa con cenizas volantes curado al vapor | HR100-50-CC-V |
| Hormigón con un 100% de sustitución por áridos de 100 MPa sin cenizas volantes curado al vapor | HR100-100-SC-V |
| Hormigón con un 100% de sustitución por áridos de 100 MPa con cenizas volantes curado al vapor | HR100-100-CC-V |
| Hormigón con un 100% de sustitución por áridos de 60 MPa sin cenizas volantes curado al vapor | HR60-100-SC-V |
| Hormigón con un 100% de sustitución por áridos de 60 MPa con cenizas volantes curado al vapor | HR60-100-CC-V |
| Hormigón con un 100% de sustitución por áridos de 60 MPa sin cenizas volantes curado al vapor | HR60-100-SC-V |
| Hormigón con un 100% de sustitución por áridos de 60 MPa con cenizas volantes curado al vapor | HR60-100-CC-V |
| Hormigón con un 50% de sustitución por áridos de 40 MPa sin cenizas volantes curado al vapor | HR40-50-SC-V |
| Hormigón con un 50% de sustitución por áridos de 40 MPa con cenizas volantes curado al vapor | HR40-50-CC-V |
| Hormigón con un 100% de sustitución por áridos de 40 MPa sin cenizas volantes curado al vapor | HR40-100-SC-V |
| Hormigón con un 100% de sustitución por áridos de 40 MPa con cenizas volantes curado al vapor | HR40-100-CC-V |

Tal y como se ha mencionado anteriormente la sustitución se realizó en árido grueso. La gravilla de río (4-11 mm) y gravilla de machaqueo (4-10mm) fueron sustituidas en 50% y 100% por los áridos reciclados. En todos los hormigones (tanto en la fase 1 como en la fase 2) se utilizó la arena de río (0-2mm) como la arena de río (0-4mm) natural en 100%.

4.1.2.1.- Fase 1: Hormigones curados en la cámara húmeda

Debido a la capacidad de absorción de los áridos reciclados, se utilizaron con una alta cantidad de humedad, para poder controlar la relación agua/cemento efectiva. Para mejorar la trabajabilidad del hormigón fresco en todos los hormigones fabricados se le añadió un aditivo superplastificante. En todos los hormigones se utilizó la misma cantidad de aditivo.

Tabla 10: Dosificación Fase 1

| Hormigones | Arena (0-2) (Kg/m3) | Arena (0-4) | Gravilla (4-11) | Gravilla (4-10) | AR | Cemento | Ceniza | Agua total | A/C efectiva | Aditivo (%) |
|--------------|---------------------|-------------|-----------------|-----------------|------|---------|--------|------------|--------------|-------------|
| HC-SC | 215 | 711 | 302 | 784 | - | 380 | - | 143 | 0,287 | 1,5 |
| HC-CC | 182 | 711 | 302 | 784 | - | 266 | 114 | 143 | 0,287 | 1,5 |
| HR100-50-SC | 215 | 711 | 151 | 392 | 505 | 380 | - | 154 | 0,287 | 1,5 |
| HR100-50-CC | 182 | 711 | 151 | 392 | 505 | 266 | 114 | 154 | 0,287 | 1,5 |
| HR100-100-SC | 215 | 711 | - | - | 1010 | 380 | - | 166 | 0,287 | 1,5 |
| HR100-100-CC | 182 | 711 | - | - | 1010 | 266 | 114 | 166 | 0,287 | 1,5 |
| HR60-50-SC | 215 | 711 | 151 | 392 | 487 | 380 | - | 159 | 0,287 | 1,5 |
| HR60-50-CC | 182 | 711 | 151 | 392 | 487 | 266 | 114 | 158 | 0,287 | 1,5 |
| HR60-100-SC | 215 | 711 | - | - | 974 | 380 | - | 177 | 0,287 | 1,5 |
| HR60-100-CC | 182 | 711 | - | - | 974 | 266 | 114 | 176 | 0,287 | 1,5 |
| HR40-50-SC | 215 | 711 | 151 | 392 | 469 | 380 | - | 163 | 0,287 | 1,5 |

| | | | | | | | | | | |
|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-----|
| HR40-50-CC | 182 | 711 | 151 | 392 | 469 | 266 | 114 | 163 | 0,287 | 1,5 |
| HR40-100-SC | 215 | 711 | - | - | 938 | 380 | - | 182 | 0,287 | 1,5 |
| HR40-100-CC | 182 | 711 | - | - | 938 | 266 | 114 | 183 | 0,287 | 1,5 |

4.1.2.2.- Fase 2: Hormigón con y sin cenizas volantes y curadas en la cámara de vapor

En esta fase de fabricación, se siguieron los mismos procedimientos que en la fase anterior en cuanto a relación agua/cemento efectiva y las proporciones de aditivo utilizadas anteriormente. Sin embargo, tal y como se ha mencionado anteriormente en esta fase el curado se ejecutó en la cámara de vapor. La asignación del hormigón es el mismo pero añadiendo la terminación “-V” al final del nombre, por ejemplo HR60-100-SC-V.

4.1.3.- Probetas, densidad y compactación del hormigón fresco

Las probetas utilizadas durante el proceso de fabricación fueron probetas cúbicas y probetas cilíndricas en cada fabricación. Cada fabricación se dividía en dos, una con adicción de cenizas volantes y la otra restante sin adicción de ceniza volante, y de cada una de estas unas se curaban en la cámara de vapor y las otras a temperatura ambiente.

El proceso que se ha seguido para rellenar las probetas es el siguiente:

Primero de todo, las probetas se impregnan con aceite para que a la hora de desmoldar sea más fácil y que el hormigón no se quede adherido a las probetas. Se colocan todas las probetas en serie y se rellenan hasta la mitad seguidamente se realiza la compactación mediante la tabla de vibrado, así asegurarse que se han rellenado todos los huecos vacíos, y no obtendrá porosidad ni huecos vacíos en el hormigón. Se usa la tabla de vibrado ya que es un hormigón seco y con la compactación manual mediante la barra metálica es más dificultosa. Una vez se han compactado todas las probetas, se realiza la segunda fase rellenando la probeta hasta arriba, pero antes, la mezcla que todavía está en la mezcladora se somete a otro ciclo de mezclado, finalmente se rellenan todas la probetas y se vuelven a vibrar todas las muestras.

Una vez todas las muestras se han compactado, se procede a rasurar las probetas, así conseguimos que la cara superior de la probeta quede lisa y quitamos el material residual. El hecho de asegurarnos de que tendrá la superficie bien lisa es importante para los futuros ensayos que serán sometidas las probetas.

Una comprobación, que se realiza con el hormigón fresco, es la determinación de su densidad. Consiste en determinar el peso inicial de la probeta metálica de un litro de volumen, y a continuación se rellena de hormigón fresco con su compactación correspondiente y se vuelve a pesar la probeta para poder obtener la densidad del hormigón, y esta densidad experimental tiene que corresponder con la determinada calculada por la dosificación del hormigón.

Por último, las probetas que son curadas a temperatura ambiente son protegidas con una malla húmeda y un plástico, así se evita la evaporación del agua de las probetas. Las otras probetas son curadas en la cámara de vapor, únicamente se introducen en la cámara, pasaran 24 horas antes de que las probetas sean desmoldadas.

4.1.4.- Desmolde y marcaje de las probetas

Una vez han pasado las 24 horas, se procede a desmoldar las probetas, y son marcadas mediante el código correspondiente a cada tipología de hormigón y la fecha de su fabricación para saber en qué momento se deben ensayar, ya que el siguiente paso es introducirlas en la cámara húmeda. La cámara se mantiene en condiciones estacionarias de 21°C y un 95% de humedad, hasta que sean retiradas a 7, 28 o 90 días para realizar los ensayos de resistencia y de durabilidad.



Figura 26: Curado de las probetas en la cámara húmeda

4.1.5.- Curado en cámara de vapor

El procedimiento utilizado para el curado a vapor de las probetas fabricadas ha sido efectuado en base a estudios previos [40]. Tras la fabricación de las probetas se procede a introducir dichas probetas en una cámara estanca con agua en la base en contacto con unas resistencias que se calientan a la temperatura programada. Las primeras 4 horas la cámara está a 30 grados. Tras las cuatro horas se incrementa la temperatura progresivamente durante 3h hasta los 60 grados y se deja a esta temperatura hasta las 16 horas desde el inicio. Pasadas las 16 horas se baja la temperatura progresivamente hasta los 30 grados nuevamente y se deja en reposo a esta temperatura hasta las 24h.

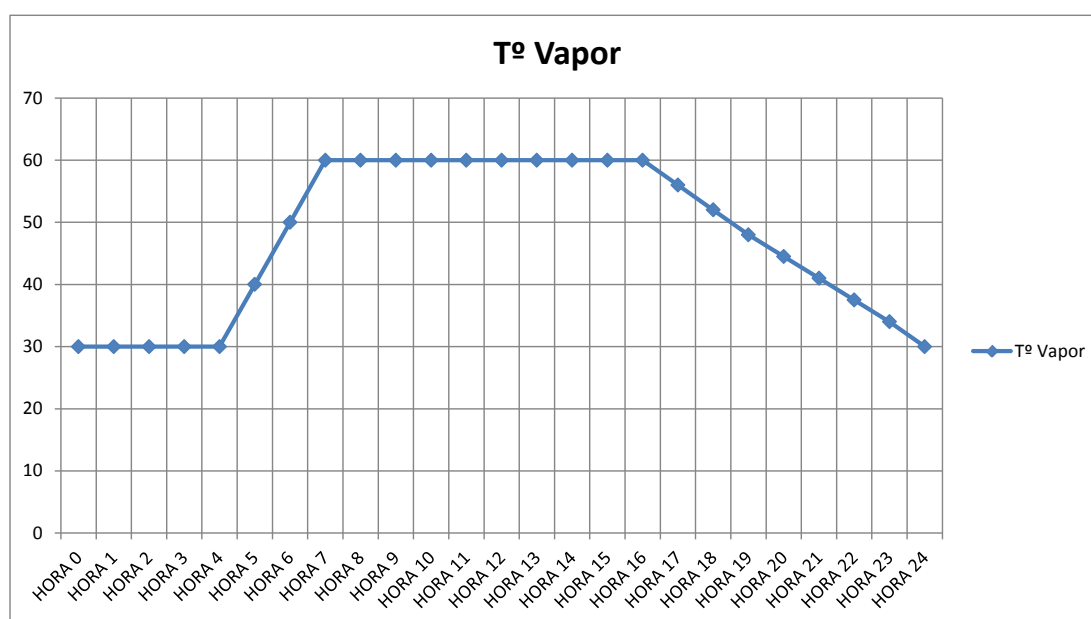


Figura 27: Distribución de temperatura durante el curado a vapor (Temperatura/Horas)

4.2.- Ensayos del hormigón

En este apartado podremos ver los diferentes ensayos, que hemos utilizado, clasificados adecuadamente en ensayos mecánicos, ensayos físicos y ensayos de durabilidad.

4.2.1.- Ensayos mecánicos

4.2.1.1.- Ensayo de compresión

Para evaluar la resistencia a compresión del hormigón fabricado, se realizó el ensayo de las probetas a la edad de 24 horas, 7, 28 y 90 días, según la normativa UNE-EN 12390-3.

La realización del ensayo consiste en aplicar una carga a las probetas de forma que estas sean comprimidas hasta llegar a su punto de rotura.



Figura 28: Prensa para romper las probetas

La máquina de rotura de las probetas está formada de dos platos de acero con las caras planas y con una superficie superior de como mínimo un 3% de la superficie de la probeta en que se realiza el ensayo. El grueso de los platos tiene que garantizar la indeformabilidad de estos durante la realización del ensayo, un vez se introduce la probeta se va aplicando la carga de forma continua, y el aumento de la tensión mediana que se va aplicando a la probeta será de alrededor de $0.5 \pm 2 \text{MPa/s}$ ($\text{N/mm}^2\text{s}$). Es importante que la velocidad a la que se introduce la carga sea constante hasta la rotura.

El valor de la carga de rotura será la carga máxima conseguida y se calculará la resistencia a compresión del hormigón.

Para obtener unos resultados adecuados, se deben recubrir las superficies de contacto de la probeta con mortero de azufre sobre la cara rugosa, de forma que las caras de las probetas estén totalmente planas, puesto que además de que fueron enrasadas manualmente pueden quedar irregularidades a la superficie de esta.

4.2.1.2.- Ensayo de tracción indirecta – Ensayo Brasileño

Las probetas fueron ensayadas a la edad de 28 días de curado. Por cada tipo de dosificación se ensayaron 3 probetas cilíndricas de 10x20 cm, siguiendo la norma UNE 83-306-85.

El ensayo consiste en comprimir las muestras aplicando una carga hasta la rotura en la misma máquina de prensado en la que se realiza el ensayo de compresión. Ahora bien, la probeta se coloca horizontalmente, de manera que las superficies planas quedan perpendiculares al plato

de la carga, así la carga aplicada es sobre la generatriz de la probeta. En este ensayo, la carga también se aplica de forma continua, el aumento de la tensión de la tracción indirecta es de $0.3 \pm 0.1 \text{ Kp/cm}^2/\text{s}$ ($0.03 \pm 0.01 \text{ MPa/s}$).

La tensión indirecta se calculada utilizando la siguiente formulación:

$$f_{ti} = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot l \cdot d}$$

Donde;

f_{ti} - tensión indirecta

P - carga aplicada

l - longitud de la probeta

d - diámetro de la probeta

La tensión de rotura a tracción indirecta se redondeara a 1 kp/cm^2 (0.1 MPa).

4.2.1.3.- Módulo de elasticidad

Se evaluó el módulo de elasticidad en compresión de 3 probetas cilíndricas de $10 \times 20 \text{ cm}$ de cada uno de los tipos de hormigón a los 28 días de edad. Para su determinación se siguió la norma UNE 83-316-96.

Para realizar este ensayo es necesario utilizar una máquina que sea capaz de aplicar la carga a la velocidad específica y de mantenerla en el escalón correspondiente. Además, se necesitan instrumentos para medir los cambios de longitud, teniendo una base de medida no menor de dos tercios del diámetro de la probeta de ensayo y que permita su colocación en tal forma que los puntos de medida sean equidistantes de las bases de la probeta y a una distancia no menor de un cuarto de la altura de la misma.

Previamente a este ensayo se debe haber obtenido el valor de la resistencia a rotura por compresión ya que se aplican 3 ciclos de carga hasta un tercio del valor de la tensión de rotura por compresión obtenida.

La tensión se incrementa uniformemente a una velocidad de $0.5 \pm 0.2 \text{ N/mm}^2/\text{s}$ hasta ese valor, en el que se mantiene durante 60 segundos y se registran la deformación medida, tomando lecturas de cada línea de medida con intervalos de 30 segundos.

4.2.2.- Ensayos físicos

4.2.2.1.- Ensayos de densidad, absorción y poros accesibles

Para la determinación de la densidad, la absorción de agua y los poros accesibles del hormigón endurecido se ensayaron 3 probetas cúbicas de 10x10 cm de cada tipo de hormigón, siguiendo la norma ASTM C642-97.

Las muestras se pesan y se extrae su peso inicial, entonces se introducen en el horno a 110°C durante 48 horas. Una vez pasadas las 48 horas se dejan enfriar a una temperatura de 20-25°C y se mide el peso si el peso es más pequeño que el 0,5 por ciento del peso 24 horas antes, la muestra se considera seca. Si no es así entonces se vuelve a introducir al horno 24 horas más y se vuelve a determinar su peso, y al valor obtenido se le denominará A.

Una vez las probetas están secas, estas son sumergidas a 21°C durante un periodo de 48 horas, hasta que las probetas obtienen un aumento de la masa menos de 0,5% del valor del más grande. La superficie seca de la muestra mediante la eliminación de la humedad de la superficie con una toalla, y entonces se determina la masa, designando la masa de la probeta después de la inmersión B.

La masa saturada después de hervir las probetas, se introduce la muestra saturada en un recipiente con agua, se deja hervir durante 5 horas y a continuación se deja enfriar la muestra a una temperatura de 20°C a 25°C, y por último se determina la masa de la muestra, se designa con la letra C.

Determinación de la masa hidrostática, después que la muestra ha sido saturada y hervida, se determina la masa hidrostática en el agua, se designa con la letra D.

Absorción después de la inmersión %, $= [(B-A)/A] \cdot 100$

Absorción después de la inmersión y hervir %, $= [(C-A)/A] \cdot 100$

Densidad aparente seco $= [A/(C-D)] \cdot \rho = g_1$

Densidad aparente después de la inmersión y hervir $= [C/(C-D)] \cdot \rho$

Densidad aparente $= [A/(A-D)] \cdot \rho = g_2$

Volumen de los poros accesibles %, $= [(g_2 - g_1)/g_2] \cdot 100$

4.2.2.2.- Ensayo UPV (Ultrasonic Pulse Velocity)

El ensayo consiste en determinar la velocidad de propagación de los impulsos ultrasónicos a través de las probetas cúbicas de 10x10 cm a la edad de 28 días de curado, según la normativa BS EN 12504-4:2004. Se trata de un ensayo no destructivo.

El aparato emite unos impulsos ultrasónicos, los cuales serán objeto de medida. Dicho aparato está formado por un par de palpadores (emisor-receptor), un amplificador y un temporizador eléctrico para medir el intervalo de tiempo transcurrido.

Para la realización del ensayo es necesario calibrar el aparato previamente, para poder hacer una lectura precisa.



Figura 29: Calibración del aparato UPV

Una vez calibrado, se unta con un círculo de vaselina ambos lados para colocar el palpador encima y realizar la medida mediante la lectura del impulso.



Figura 30: Medidor UPV

Las velocidades del UPV propuestas por algunos autores, como es el caso de Whitehurts [43] era determinar la calidad de los hormigones con una densidad de alrededor de 2400 kg/m^3 se consideran como:

Tabla 11: Velocidad del UPV

| | Velocidad (m/s) |
|------------|-----------------|
| Excelentes | 4500 |
| Buenas | 4500-3500 |
| Dudosas | 3500-3000 |
| Pobres | 3000-2000 |

4.2.3.- Durabilidad

4.2.3.1.- Ensayo de succión capilar

La absorción capilar se determinó con el procedimiento descrito en la norma UNE-EN 14701-1:2007– Succión Capilar.

Este ensayo tiene como objetivo la determinación del coeficiente de succión capilar (S) a partir de una probeta de hormigón endurecido. Este coeficiente nos da una idea acerca de la porosidad de dicho hormigón.

Para la realización de este ensayo se requieren tres probetas cúbicas de hormigón 10x10x10 cm que hayan curado durante 28 días.

Se impermeabilizan los 2 primeros centímetros de la franja lateral de una de las bases de cada una de las piezas, mediante pintura de poliuretano.

Seguidamente se introducen las tres probetas en una estufa secadora a 40°C el tiempo necesario hasta alcanzar masa constante lo que significa que la muestra está completamente seca.

Una vez alcanzada esta condición, se introduce uno de los extremos de estas probetas en una lámina de agua de 5 mm de profundidad y se procede a determinar la absorción mediante la variación de peso en función del tiempo para cada una de las muestras ensayadas, los resultados se registran en una tabla que ha de contener las masa de los probetas al cabo de 5, 10, 15 y 30 minutos y 1, 2, 3, 4, 6, 24, 48 y 72 horas.

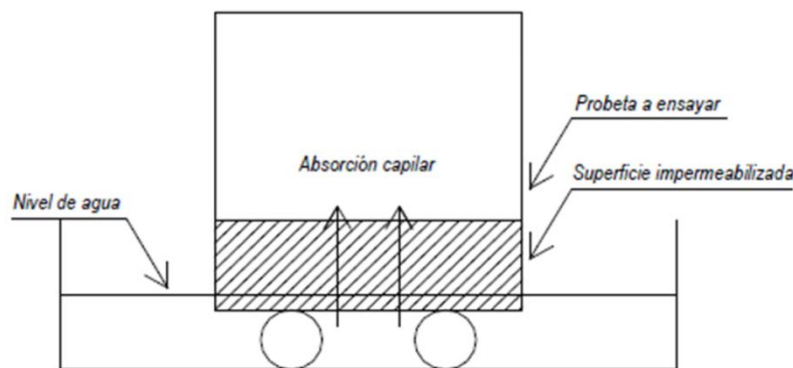


Figura 31: Esquema del ensayo

El coeficiente de succión se determina según su definición, mediante la relación entre el volumen de agua absorbido por unidad de área entre la raíz cuadrada del tiempo:

$$\frac{1}{\theta} \int F dt = S \cdot t^{1/2}$$

Siendo S la succión.



Figura 32: Probetas sobre lámina de agua

4.2.3.2.- Ensayo de penetración por cloruros

Este ensayo mide, siguiendo la normativa ASTM C 1202-97, la resistencia del hormigón al paso de los iones cloruros a lo largo de su estructura porosa cuando esta se encuentra saturada.

Las probetas utilizadas son cortadas anteriormente, con una longitud de 51 mm, de las probetas cilíndricas estandarizadas. Por lo tanto, la edad del hormigón en el momento del ensayo será de 28 días.

Las probetas son impermeabilizadas en la cara lateral, de tal manera que el contacto del hormigón con el exterior se reduce tan solo a la superficie de la base. Una vez impermeabilizada se procede a sumergirla y someterla al vacío durante 24 horas para garantizar que no quede aire dentro de los poros.



Figura 33: Impermeabilización de las probetas para el ensayo de penetración de cloruros



Figura 34: Extracción del aire de los poros sumergiendo la probeta al vacío

Pasadas las 24 horas se fijan las probetas entre dos placas metálicas situadas en la parte central de unas piezas de metacrilato. Seguidamente se fijan los laterales de las bases cilíndricas con silicona para que las probetas no tengan contacto con el exterior.

Una vez seca la silicona se introduce disolución de hidróxido de sodio (NaOH) y cloruro de sodio disuelto (NaCl) en unos depósitos que contienen las piezas de metacrilato y que están en contacto directo con las placas metálicas.

Las concentraciones de cada una de las disoluciones son:

- Hidroxido de sodio (NaOH): 12 gramos por cada litro de disolución.
- Cloruro de sodio (NaCl): 30 gramos por cada litro de disolución.

Una vez se ha rellenado todo el depósito, las placas metálicas se conectan a una fuente de alimentación de corriente continuo que proporcionara un voltaje entre placas de 60V.

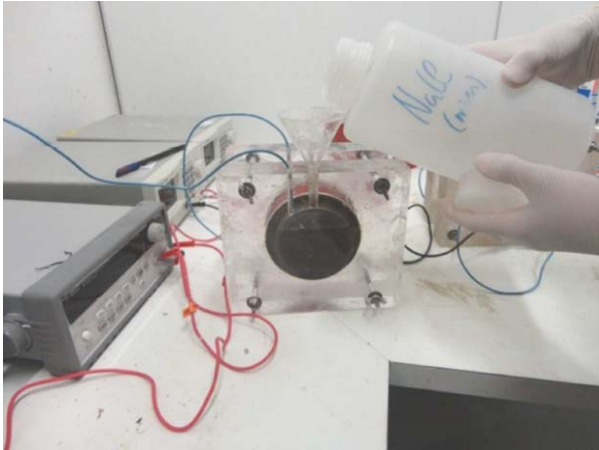


Figura 35: Llenado de depósitos con NaOH y NaCl

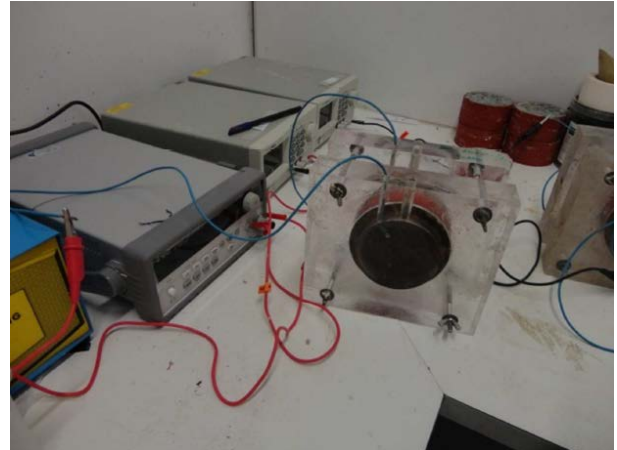


Figura 36: Ensayo de penetración de cloruros

La fuente de alimentación proporcionar los valores de la intensidad en cada instante. Estos se recogerán en intervalos de 30 minutos durante 6 horas.

El valor de la carga eléctrica del hormigón (C) se determinara mediante la siguiente expresión:

$$Q = 900 \cdot (I_0 + 2 \cdot I_{30} + 2 \cdot I_{60} + \dots + 2 \cdot I_{300} + 2 \cdot I_{330} + I_{360})$$

Donde I_i es la intensidad en cada intervalo de tiempo, medido en minutos.

Según el valor obtenido de la carga, se clasifica el rango de penetración según la siguiente tabla:

Tabla 12: Índice de penetración

| Carga eléctrica (C) | Índice de penetración |
|---------------------|-----------------------|
| >4000 | Alto |
| 2000-4000 | Moderado |
| 1000-2000 | Bajo |
| 100-1000 | Muy bajo |
| 100 | Nulo |

4.2.3.3.- Ensayo MIP (Mercury Intrusion Porosimetry)

Este ensayo se realiza tras romper las probetas cúbicas a compresión (a 1, 28 días). Tras romper dichas probetas se tomaron muestras de las zonas menos afectadas. Una vez obtenidas las muestras las saturamos con acetona durante cinco días i después se colocaron en la bomba de vacío durante 24 horas. Tras todo el proceso se dejaron las muestras cuatro días en la estufa a 50°C i una vez transcurrido dicho periodo de tiempo se sacaron de la estufa i se llevaron al laboratorio donde se realizó el MIP.

El ensayo MIP (apartado 2.8.1.1.-Porosidad) consiste en la inyección a alta presión de mercurio líquido por los poros de las muestras, determinando parámetros como el índice de porosidad o el diámetro de dichos poros.

El ensayo se realizó en laboratorios externos mediante la máquina “AutoPore IV 9500 V1.07”, de la marca Micromeritics Instrument Corporation.

4.2.3.4.- Ensayo de resistividad eléctrica

El ensayo se realiza a los 28 días de la probeta curada en la cámara húmeda. Las probetas ensayadas son cúbicas, de dimensiones 10x10 cm.

El procedimiento del ensayo es el siguiente: en dos lados de la probeta se aplica un gel superconductor. Este gel es un conductor eléctrico y nos servirá para pasar la corriente. Sobre este gel se colocan dos placas de cobre, una a cada lado; las placas irán conectadas a la fuente de corriente.

El ensayo analiza el voltaje y la intensidad que atraviesa la probeta. En este caso la fuente de corriente emite una corriente de 10V, y una vez se emite este voltaje anotamos la intensidad.

La resistividad es calculada de la siguiente manera:

$$\rho = \frac{A \cdot R}{L}$$

Donde,

ρ – Resistividad (Ohm·cm)

A – Área (cm²)

L – Largada (cm)

R – Resistencia (Ohm)



Figura 37: Ensayo de resistividad eléctrica

Los valores que determinan la resistividad frente al riesgo de corrosión vienen dados por Langford y Broomfiel en 1987 [44].

Tabla 13: Valores de la resistividad

| Resistivity Ohm-cm | Corrosión Rate |
|--------------------|----------------|
| <5.000 | Muy alto |
| 5.000-10.000 | Alto |
| 10.000-20.000 | Moderado-Bajo |
| >20.000 | Bajo |

5.- Resultados

En este capítulo se muestran y se analizan los resultados obtenidos en todos los ensayos realizados en el hormigón endurecido. Todos ellos permitieron determinar las propiedades mecánicas, físicas y de durabilidad de los diferentes hormigones fabricados.

5.1.1.- Resistencia a compresión simple

La resistencia a compresión de los hormigones fue evaluada en probetas cúbicas de 10x10 cm de lado a la edad de 24 horas, 7, 28 y 90 días.

5.1.1.1.- Fase 1 – Cámara húmeda

En la tabla 14 se puede observar los resultados de resistencia a compresión obtenidos por todos los hormigones a 24 horas, 7, 28 y 90 días de edad.

Tabla 14: Resultados resistencia a compresión Fase 1, (%) crecimiento de la resistencia de 24 horas a 7 días, de 24 horas a 28 días y de 28 días a 90 días

| | 24h (MPa) | 7días (MPa) | 28días (MPa) | 90días (MPa) |
|--------------|-----------|-------------|--------------|--------------|
| HC-SC | 75,1 | 91,6 (22%) | 97,7 (30%) | 104,5 (7%) |
| HC-CC | 54,1 | 76,6 (41%) | 90,7 (68%) | 102,8 (13%) |
| HR100-50-SC | 69,1 | 89,3 (29%) | 95,8 (39%) | 105,4 (10%) |
| HR100-50-CC | 56,1 | 79,0 (40%) | 95,6 (70%) | 108,0 (13%) |
| HR100-100-SC | 68,8 | 92,8 (35%) | 103,5 (50%) | 117,3 (13%) |
| HR100-100-CC | 56,8 | 77,9 (37%) | 98,3 (73%) | 110,8 (13%) |
| HR60-50-SC | 67,8 | 87,9 (29%) | 93,0 (37%) | 108,4 (17%) |
| HR60-50-CC | 46,9 | 72,1 (53%) | 91,1 (94%) | 99,6 (9%) |
| HR60-100-SC | 66,2 | 84,2 (27%) | 91,2 (38%) | 98,6 (8%) |
| HR60-100-CC | 46,8 | 73,1 (56%) | 84,0 (79%) | 104,1 (24%) |
| HR40-50-SC | 64,5 | 82,6 (28%) | 83,7 (29%) | 100,0 (19%) |
| HR40-50-CC | 47,0 | 74,3 (58%) | 78,5 (67%) | 102,0 (30%) |
| HR40-100-SC | 63,0 | 79,0 (25%) | 87,2 (38%) | 93,0 (7%) |
| HR40-100-CC | 44,2 | 64,7 (46%) | 77,4 (75%) | 88,1 (14%) |

A partir de los valores de la tabla 14 se puede observar como a las 24 horas, todos los hormigones SC o CC a partir de 100 MPa superan las resistencias a edades tempranas de algunas normativas para elementos prefabricados [49].

Además, se puede observar que a 24 horas de edad los hormigones fabricados con 100% de cemento portland (SC, sin cenizas) obtuvieron resistencias superiores a los hormigones fabricados con cenizas volantes. Sin embargo esta diferencia va disminuyendo a medida que aumenta el tiempo de curado. A 90 días de edad, los hormigones fabricados con adición de cenizas volantes (CC) alcanzaron o superaron las resistencias obtenidas por los hormigones fabricados con cemento portland (SC).

También se puede ver en la tabla 14, el crecimiento de la resistencia en porcentaje que tuvieron cada uno de los hormigones. Se puede observar como en los primeros días el crecimiento fue mayor y este va disminuyendo conforme pasan los días.

En las siguientes figuras 38 y 39 se analizan de forma comparativa, la relación entre la resistencia obtenida de los hormigones fabricados con áridos reciclados con respecto al hormigón convencional, en las primeras 24 horas. La figura 38 describe la valoración de los hormigones fabricados con cemento portland y la figura 39 analiza los hormigones fabricados con 30% de cenizas volantes. Las líneas discontinuas marcan el 100% correspondiente al hormigón convencional.

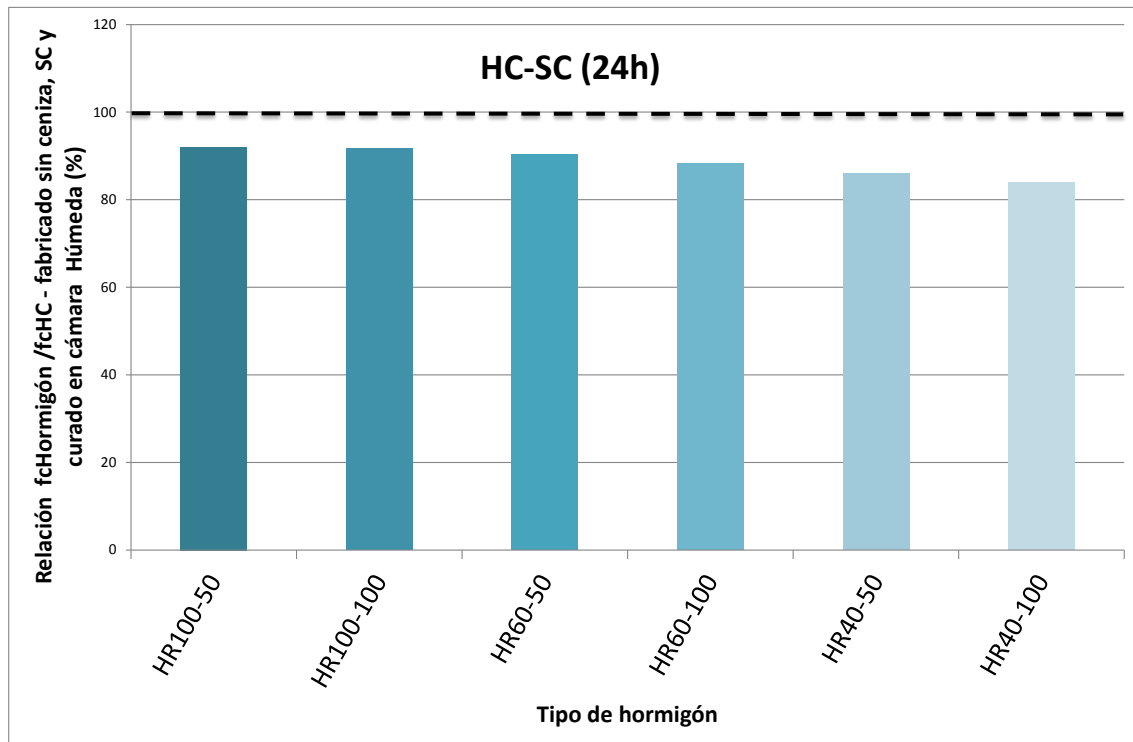


Figura 38: Resistencia a compresión a 24 horas del hormigón sin ceniza y curado en la cámara húmeda

Tal y como se puede apreciar en la figura 38, hormigones fabricados con solo cemento (sin cenizas volantes), ningún hormigón fabricado con árido reciclado alcanzó la resistencia del hormigón convencional. A medida que el árido reciclado utilizado en la fabricación del hormigón era de peor calidad se obtuvo menor resistencia. Por otro lado en hormigones fabricados con árido reciclado de hormigones procedentes de 60 y 40 MPa a medida que aumentaba la sustitución la resistencia obtenida por el hormigón era menor.

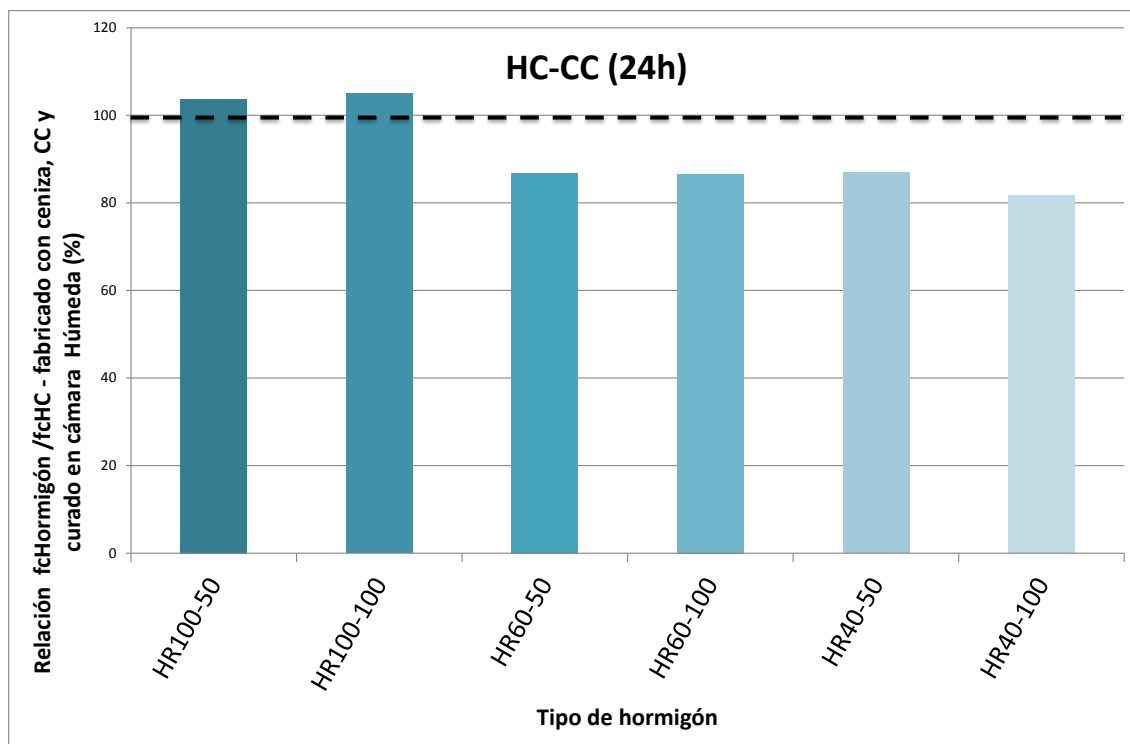


Figura 39: Resistencia a compresión a 24 horas del hormigón con ceniza y curado en la cámara húmeda

Tal y como se puede ver en la figura 39 (correspondiente a hormigones fabricados con cenizas volantes y curado en cámara húmeda) los hormigones fabricados con árido reciclado procedentes de hormigones de 100MPa alcanzaron resistencias superiores al hormigón convencional.

Se observa que ningún hormigón fabricado con 30% de cenizas volantes supera las resistencias obtenidas por hormigones fabricados exclusivamente con cemento portland. La reducción en general fue aproximadamente del 30%. Debe tenerse en cuenta que la resistencia obtenida a las 24 horas por el hormigón convencional fabricado con cemento portland fue un 20% mayor que el hormigón con adicción de cenizas volantes.

En la figura 40 y 41 se describen las relaciones de las resistencias a compresión a 28 días de edad de los hormigones con árido reciclados respecto al obtenido por el hormigón convencional fabricados con cemento portland (SC) y utilizando cenizas volantes (CC), respectivamente, después del curado en cámara húmeda.

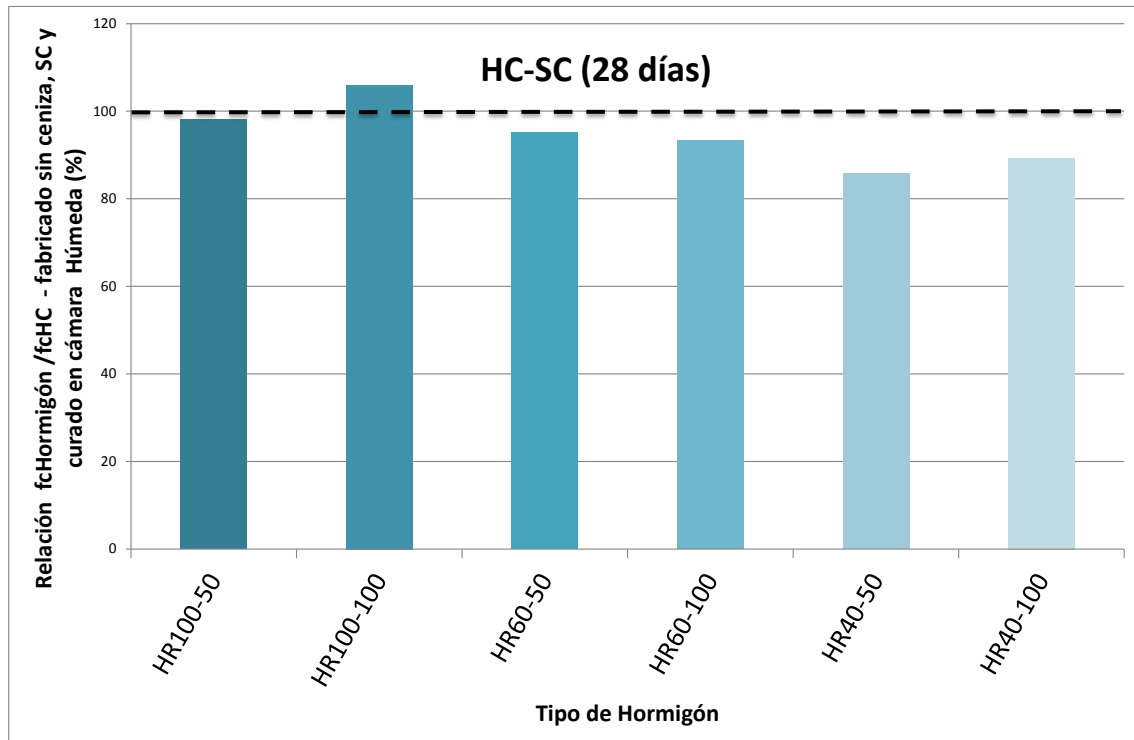


Figura 40: Resistencia a compresión a 28 días del hormigón sin ceniza y curado en la cámara húmeda

Tal y como se puede apreciar en la figura 40, el hormigón fabricado con árido reciclado que procedía de un hormigón de 100MPa alcanzó la resistencia del hormigón convencional. Los hormigones fabricados con árido reciclado de 60MPa sufrieron una pérdida de resistencia inferior al 7% respecto al hormigón convencional, mientras que los hormigones fabricados con árido reciclado de 40MPa sufrieron una reducción de la resistencia mayor al 15%.

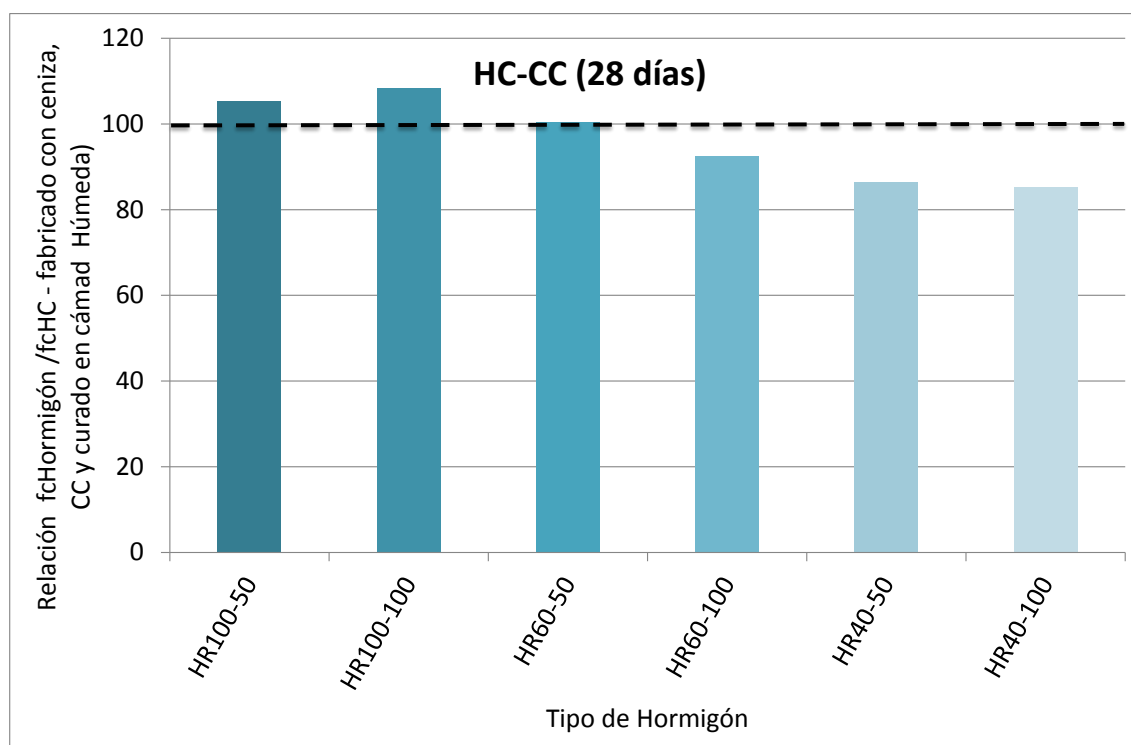


Figura 41: Resistencia a compresión a 28 días del hormigón con ceniza y curado en la cámara húmeda

Tal y como se puede ver en la figura 41, los hormigones fabricados con 100% de áridos reciclado procedente de hormigones de 60MPa sufren una reducción del 10% en la resistencia a compresión y los hormigones fabricados con áridos reciclados de 40MPa alcanzan reducciones superiores al 15% con respecto la resistencia del HC-CC.

De acuerdo a los resultados obtenidos por los hormigones fabricados con 30% de cenizas volantes, se puede destacar que a 28 días de curado en la cámara húmeda el hormigón convencional obtuvo 7% menos de resistencia que el hormigón fabricado exclusivamente con cemento portland. Sin embargo los hormigones fabricados con árido reciclado procedente de hormigones de 100Mpa, alcanzaron la resistencia del hormigón convencional (ver figura 41) y también las resistencias del hormigón convencional fabricado con cemento Portland (ver tabla 14).

En la figura 42 se describe las relaciones de las resistencias de los hormigones con árido reciclados respecto al obtenido por el hormigón convencional fabricados con cemento portland (SC) y utilizando cenizas volantes (CC), respectivamente, a los 90 días de edad.

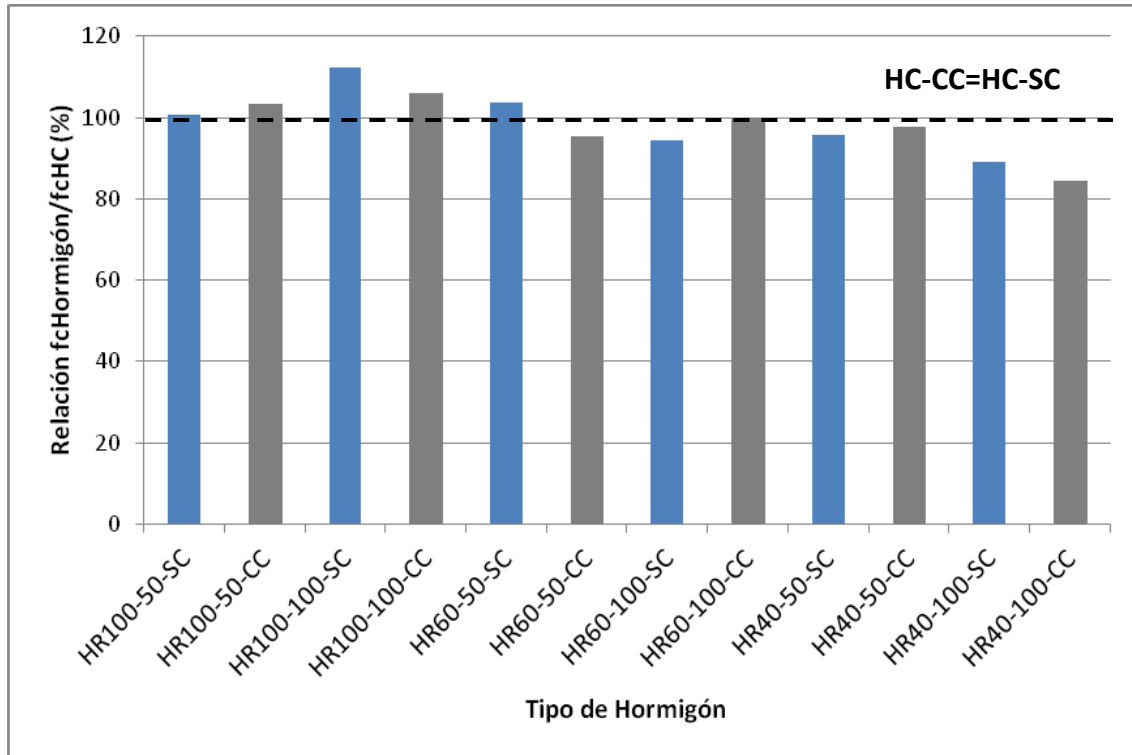


Figura 42: Resistencia a compresión a 90 días del hormigón con ceniza y curado en la cámara húmeda

Tal y como se puede ver en la figura 42 los hormigones convencionales fabricados exclusivamente de cemento portland o con 30% de cenizas volantes alcanzaron la misma resistencia a 90 día de edad.

Por otro lado se puede apreciar que los hormigones fabricados con árido reciclado procedentes de hormigones de 100MPa alcanzaron resistencias superiores al hormigón convencional cuando este fue fabricado con cemento portland como con el 30% de cenizas volantes. El hormigón fabricado con árido reciclado de 60MPa con una sustitución del 50%, supera al hormigón convencional, mientras que el hormigón con una sustitución del 100% sufre una pérdida de resistencia inferior al 6% respecto al hormigón convencional. Los hormigones fabricados con árido reciclado de 40MPa sufrieron una reducción de la resistencia mayor al 11%.

5.1.1.2.- Fase 2 - Cámara de Vapor

En la siguiente tabla podemos observar la resistencia a compresión a 24 horas, 7, 28 y 90 días de los hormigones fabricados en la fase 2. Se fabricaron los mismos hormigones que en la fase 1, pero en este caso el curado se realizó en cámara de vapor.

Tabla 15: Resultados resistencia a compresión Fase 2 (%). Crecimiento de la resistencia de 24 horas a 7 días, de 24 horas a 28 días y de 28 días a 90 días

| | 24h (MPa) | 7días (MPa) | 28días (MPa) | 90días (MPa) |
|-----------------------|-----------|-------------|--------------|--------------|
| HC-SC-V | 76,7 | 85,1 (11%) | 95,0 (24%) | 98,2 (3%) |
| HC-CC-V | 61,6 | 75,3 (22%) | 87,9 (43%) | 100,5 (14%) |
| HR100-50-SC-V | 74,8 | 83,8 (12%) | 88,0 (18%) | 102,0 (16%) |
| HR100-50-CC-V | 64,1 | 79,1 (23%) | 91,0 (42%) | 97,2 (7%) |
| HR100-100-SC-V | 79,0 | 85,2 (8%) | 92,5 (17%) | 101,5 (10%) |
| HR100-100-CC-V | 66,1 | 76,0 (15%) | 83,7 (27%) | 99,6 (19%) |
| HR60-50-SC-V | 72,9 | 81,1 (11%) | 87,0 (19%) | 101,7 (17%) |
| HR60-50-CC-V | 60,3 | 70,4 (17%) | 85,4 (41%) | 91,3 (7%) |
| HR60-100-SC-V | 69,5 | 80,3 (15%) | 87,9 (26%) | 90,4 (3%) |
| HR60-100-CC-V | 63,0 | 73,4 (16%) | 88,0 (40%) | 93,8 (7%) |
| HR40-50-SC-V | 68,5 | 71,9 (5%) | 76,6 (12%) | 88,8 (16%) |
| HR40-50-CC-V | 60,5 | 68,3 (13%) | 77,7 (28%) | 95,7 (23%) |
| HR40-100-SC-V | 64,4 | 74,0 (15%) | 79,8 (24%) | 82,4 (3%) |
| HR40-100-CC-V | 52,4 | 64,9 (24%) | 75,8 (45%) | 83,1 (10%) |

A partir de los valores descritos en la tabla 15 se puede observar que a las 24 horas, todos los hormigones superaron los 46MPa exigidos por la norma española de ADIF [49].

Tal y como se puede apreciar en la tabla 15, a las 24 horas los hormigones fabricados con cemento portland alcanzan una resistencia mayor que los hormigones fabricados con 30% de cenizas volantes. Sin embargo la diferencia es del 15%, mucho menor al existente en la fase 1.

Además, a las 24 horas los hormigones curados en la cámara de vapor alcanzaron resistencias superiores a los hormigones curados en la cámara húmeda.

Todos los hormigones con sustitución de áridos reciclados, excepto el hormigón producido con 100% de árido reciclado de 40MPa, superaron la resistencia del hormigón convencional cuando estos fueron fabricados con cenizas volantes.

A medida que avance el tiempo de curado, a 90 días, el hormigón fabricado con adición de cenizas volantes obtuvo más resistencia que los hormigones sin cenizas volantes. Y los hormigones fabricados con árido reciclado de 100MPa alcanzaron la resistencia del hormigón convencional. También podemos ver en la tabla 15, el porcentaje de crecimiento de la resistencia que tienen los hormigones. Se puede observar que el porcentaje de mayor crecimiento es a los 28 días de curados. A los 7 y 28 días el crecimiento es mayor en los hormigones con adición de cenizas volante, en cambio a los 90 días este crecimiento es mayor en los hormigones sin adición de cenizas volantes.

En las siguientes figuras 42 y 43, graficas se analizan de forma comparativa (la resistencia de los hormigones fabricados con áridos reciclados con respecto al hormigón convencional) el resultado obtenido en las primeras 24 horas del hormigón.

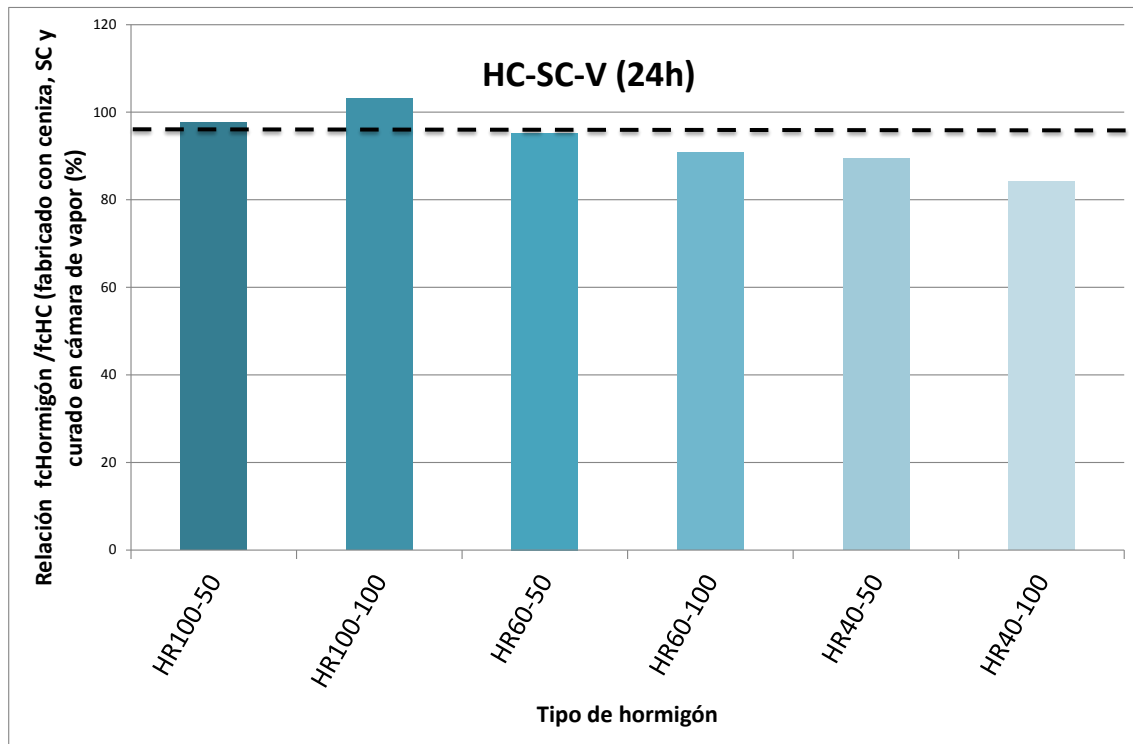


Figura 43: Resistencia a compresión a 24 horas del hormigón sin ceniza y curado al vapor

Tal y como se puede apreciar en la figura 43, los hormigones fabricados con árido reciclado procedente de un hormigón de 100MPa, obtuvieron resistencias superiores al hormigón convencional. A medida que aumentaba la sustitución del árido natural por una árido reciclado de peor calidad se apreciaba que la resistencia bajaba.

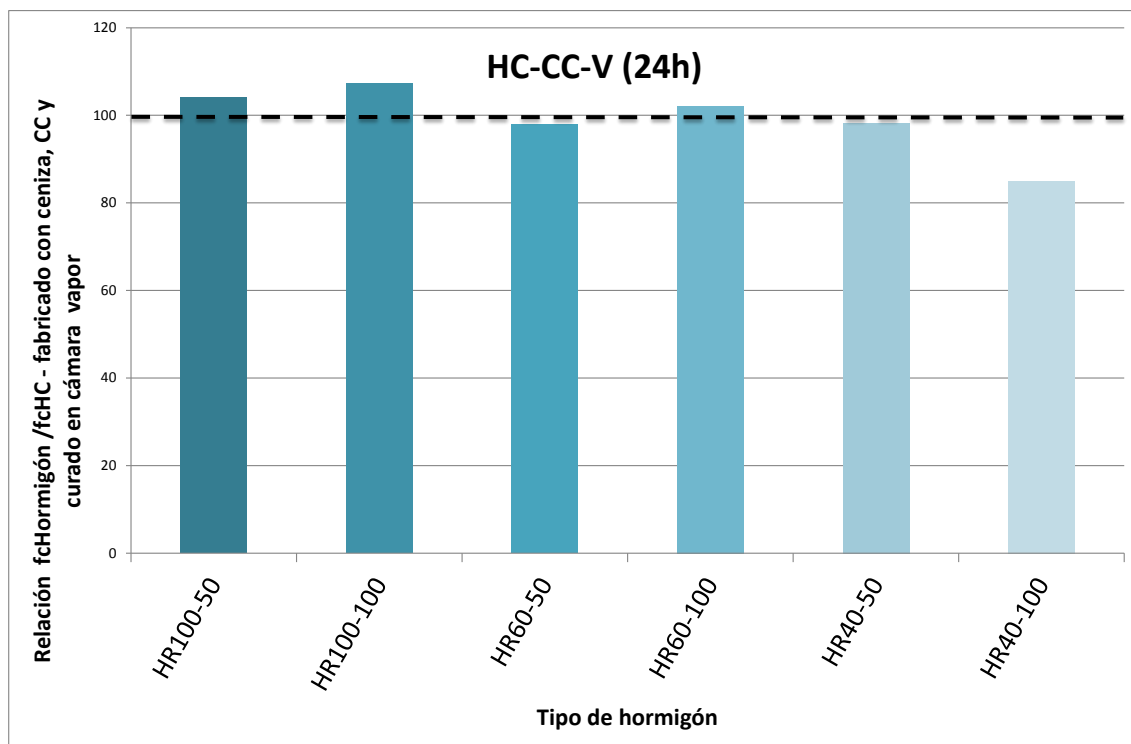


Figura 44: Resistencia a compresión a 24 horas del hormigón con ceniza y curado al vapor

Respecto a la figura 44, todos los hormigones fabricados con cenizas volantes y sometidos a cámara de vapor durante las primeras 24 horas, los hormigones alcanzaron una resistencia similar al hormigón convencional excepto el hormigón fabricado con 100% de árido reciclado de 40MPa.

En las figuras 45 y 46 se describen la relación de la resistencia de los hormigones fabricados con áridos reciclado con respecto al hormigón convencional utilizando exclusivamente cemento portland y cenizas volantes, respectivamente a 28 días de edad. Todos los hormigones estuvieron las primeras 24 horas curando en cámara de vapor y el resto del tiempo en cámara húmeda, hasta la hora del ensayo.

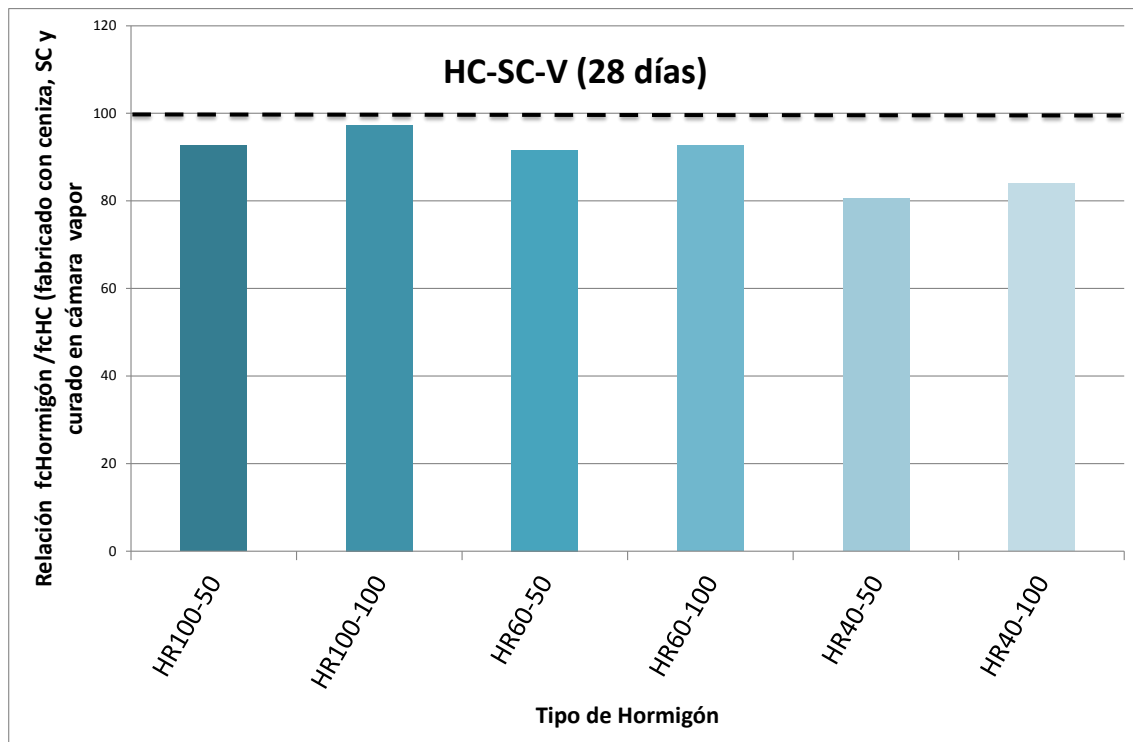


Figura 45: Resistencia a compresión a 28 días del hormigón sin ceniza y curado al vapor

De acuerdo a la figura 45, los hormigones fabricados con áridos reciclado que procedían de hormigones de 100MPa y 60MPa, obtuvieron resistencias inferiores al hormigón convencional pero la reducción fue inferior al 10%. Sin embargo los hormigones fabricados con árido reciclados de 40MPa sufrieron una reducción de aproximadamente 20% con respecto al hormigón convencional a 28 días de curado.

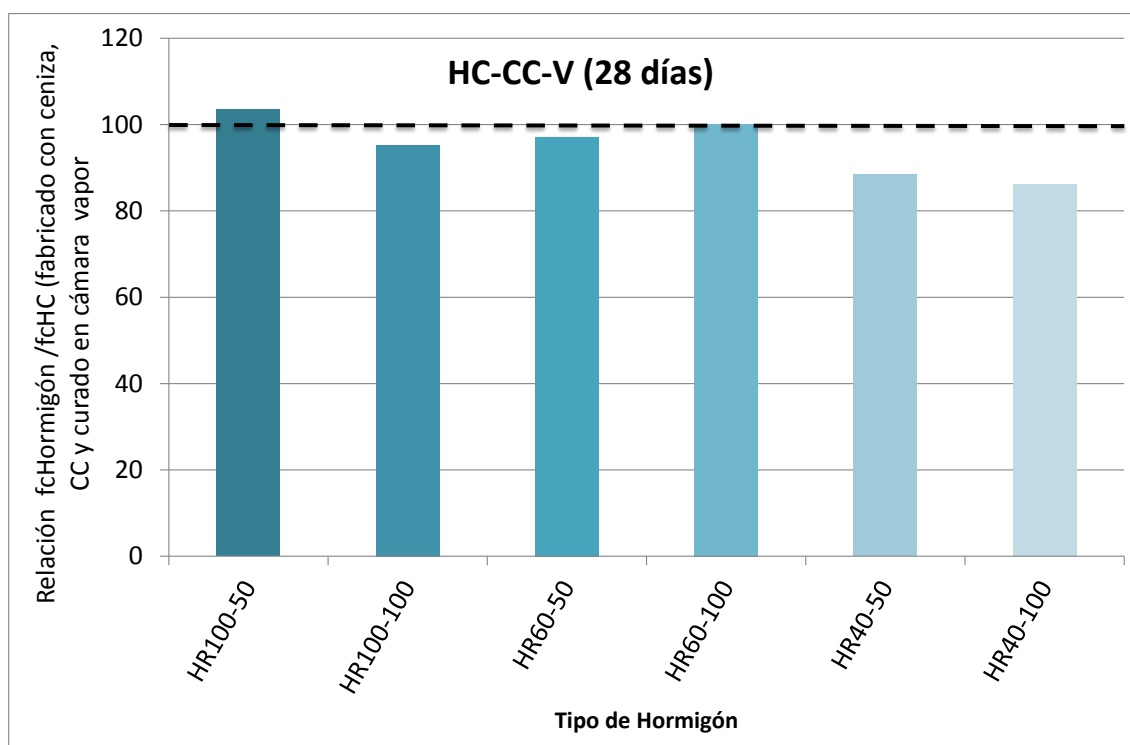


Figura 46: Resistencia a compresión a 28 días del hormigón con ceniza y curado al vapor

De acuerdo a la figura 46, los hormigones fabricados con áridos reciclado de 100MPa y 60MPa, a los 28 días de edad obtuvieron resistencias similares al hormigón convencional cuando estos fueron fabricados con ceniza volante y curado en cámara de vapor las primeras 24 horas. Los hormigones fabricados con árido reciclado de 40MPa obtienen 15% menos de resistencia que el hormigón convencional.

En la figura 47 se describe la relación de la resistencia de los hormigones fabricados con áridos reciclado con respecto al hormigón convencional utilizando exclusivamente cemento portland y cenizas volantes, respectivamente a 90 días de edad.

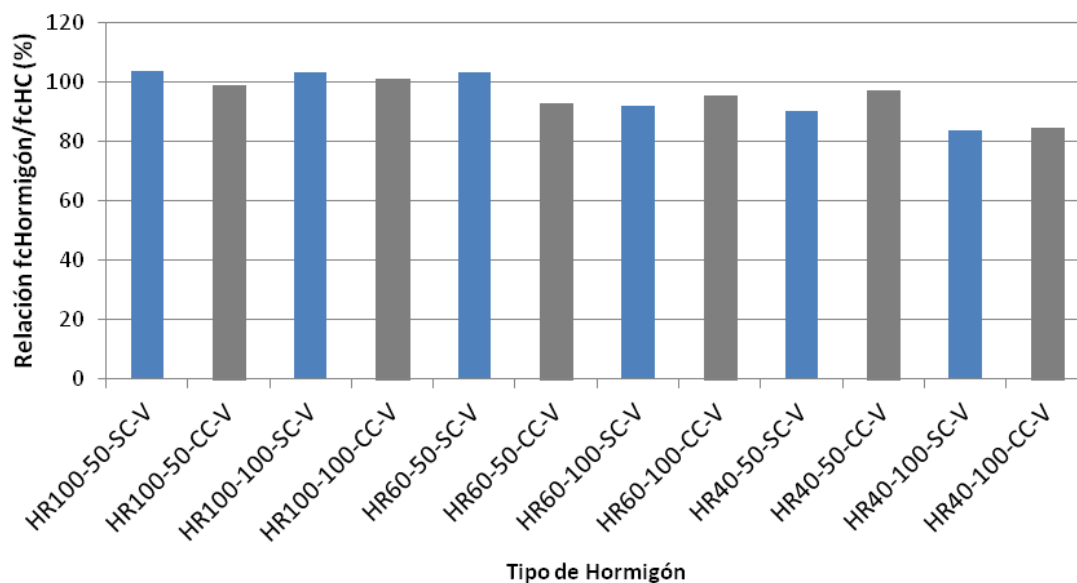


Figura 47: Resistencia a compresión a 90 días del hormigón con ceniza y sin ceniza curado al vapor

Tal y como se puede ver en la figura 47, el hormigón convencional fabricado con cemento portland como el fabricado con 30% de cenizas volantes obtuvieron resistencias similares a los 90 días edad cuando estas fueron curadas en vapor. Los resultados obtenidos fueron similares a los obtenidos en los hormigones convencionales curados en cámara húmeda (fase1).

Por otro lado se puede ver que los hormigones fabricados con áridos reciclado que procedían de hormigones de 100MPa y 60MPa (esta última con una sustitución del 50%), obtuvieron resistencias superiores al hormigón convencional tanto cuando fueron fabricados con cemento portland o utilizando el 30% de cenizas volantes. Sin embargo los hormigones fabricados con árido reciclados de 40MPa sufrieron una reducción de aproximadamente 16% con respecto al hormigón convencional a 90 días de curado.

Debido al interés que presenta la utilización de cenizas volantes en la fabricación de hormigones de altas prestaciones en este trabajo se amplió el trabajo experimental a la caracterización de las propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad de hormigones fabricados con cenizas volantes habiendo sido curados en cámara de húmeda como cámara de vapor. Se analizó la influencia de la utilización de áridos reciclado, y los resultados fueron comparados con los resultados obtenidos por el hormigón convencional.

5.1.1.3.- Comparativa entre Fase 1 y Fase 2

Lo primero que se puede observar de los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a compresión es que las resistencias se incrementan notablemente a edades tempranas cuando se utiliza un curado al vapor; sin embargo, estas mismas resistencias no alcanzan cotas tan altas a periodos prolongados (28 y 90 días). A partir de los 7 días se obtienen, en general, valores de resistencias más altos para hormigones con curado convencional.

Estos resultados son contrarios a lo expuesto por Fonseca, de Brito y Evangelista [51] que sostienen que la resistencia a compresión de los hormigones con áridos reciclados no se ve afectada por las condiciones de curado. Es pertinente destacar que tales diferencias pueden ser debidas al proceso de pre-curado utilizado por dichos investigadores que modifica sustancialmente la relación a/c de los hormigones.

Analizando los resultados mediante gráficos comparativos se puede apreciar el comportamiento de los hormigones:

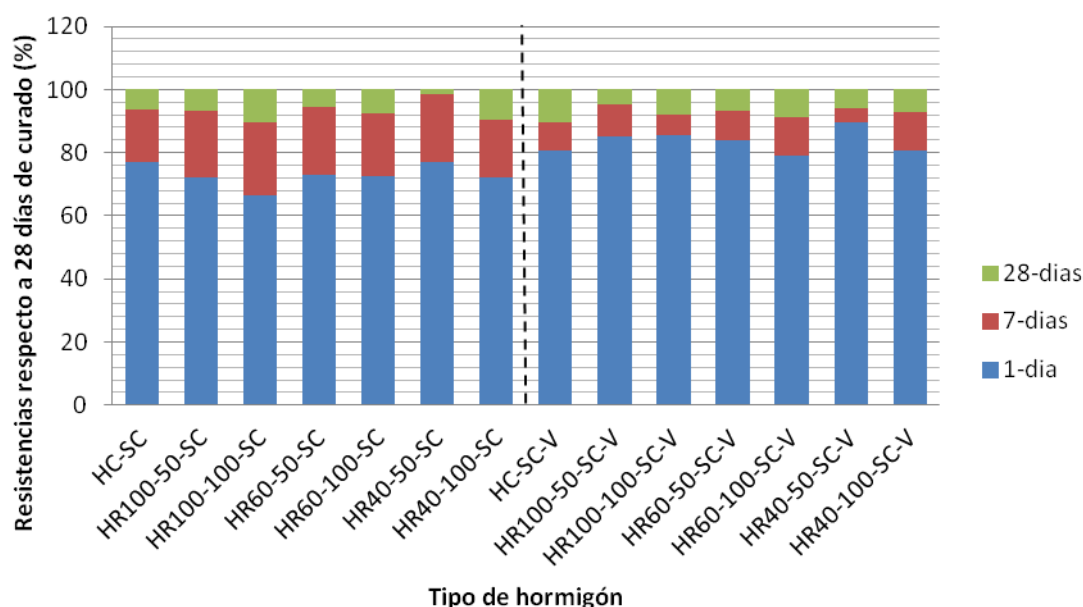


Figura 48: Comparativa de resistencias en % respecto a 28 días de curado entre hormigones sin cenizas (SC) y hormigones sin cenizas con curado al vapor (SC-V).

La figura nos muestra lo anteriormente mencionado: para hormigones sin ceniza, el curado al vapor incrementa notablemente las resistencias a corto plazo pero, para plazos más largos, estas no crecen tanto como en el caso del curado convencional.

Las diferencias a largo plazo pueden llegar a ser significativas, como en el caso del HR100-100. Tras 90 días de curado la diferencia de resistencias entre el curado convencional (117,31 MPa) y el curado en cámara de vapor (101,55 MPa) es de más de 16 MPa. A continuación se muestran tales resultados:

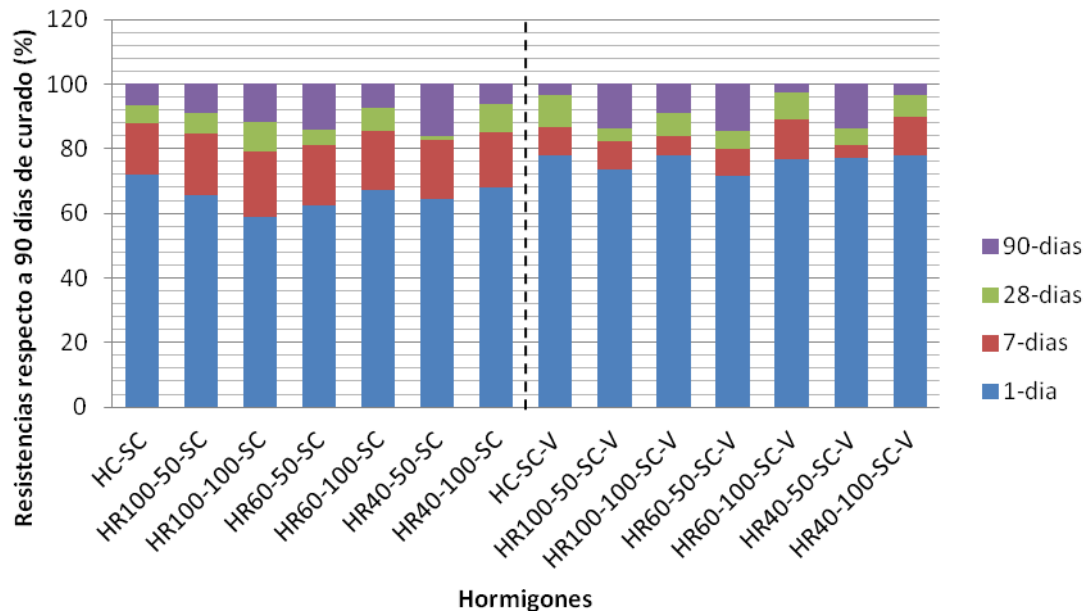


Figura 49: Comparativa de resistencias en % respecto a 90 días de curado entre hormigones sin cenizas (SC) y hormigones sin cenizas con curado al vapor (SC-V).

El comportamiento de los hormigones con cenizas es similar al de los hormigones sin cenizas. Pasadas 24 horas obtenemos valores de resistencias más altos en los hormigones curados al vapor. A medida que se incrementa el tiempo las resistencias crecen más rápido en los hormigones con curado convencional, aunque la diferencia no es tan notable como en los hormigones sin cenizas volantes. Pasados 28 días las resistencias son ligeramente superiores en los hormigones con curado convencional (exceptuado el HR60-100).

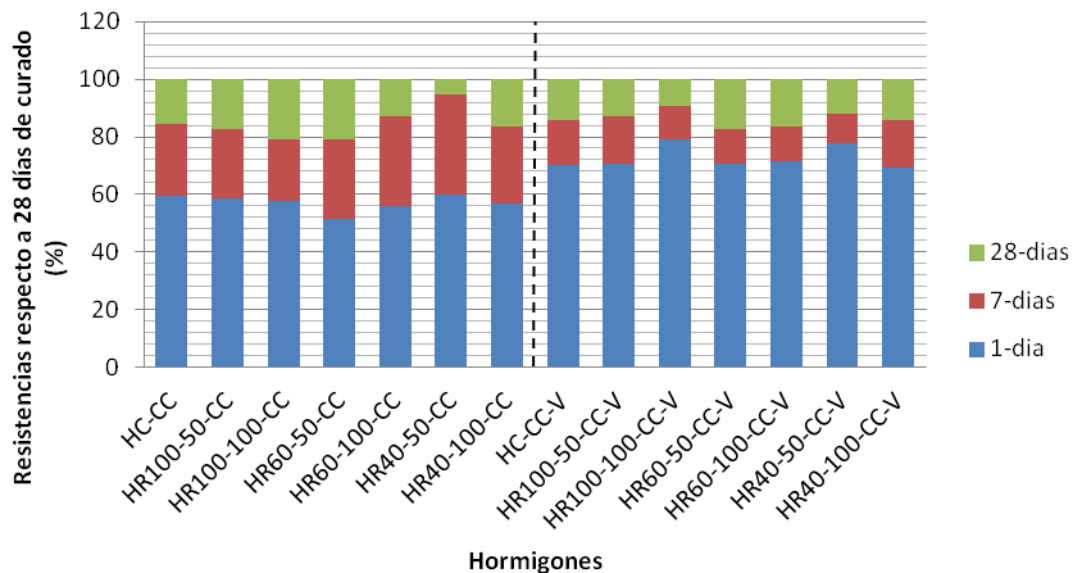


Figura 50: Comparativa de resistencias en % respecto a 28 días de curado entre hormigones con cenizas (CC) y hormigones con cenizas con curado al vapor (CC-V).

Igual que con el hormigón sin cenizas, el curado al vapor incrementa notablemente las resistencias a corto plazo pero para períodos más largos, dichas resistencias no crecen tanto como en el caso del curado convencional:

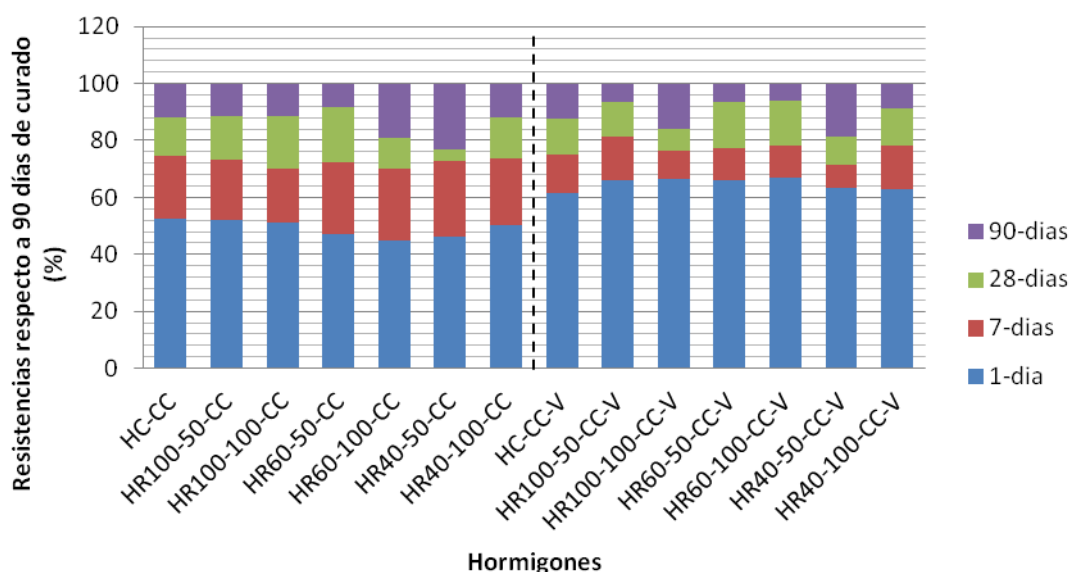


Figura 51: Comparativa de resistencias en % respecto a 90 días de curado entre hormigones con cenizas (CC) y hormigones con cenizas y con curado al vapor (CC-V).

Es interesante notar que apenas hay diferencia a largo plazo (90 días) entre hormigones con cenizas y curado a vapor y entre hormigones sin ceniza y con curado a vapor. Un análisis de las resistencias a largo plazo (90 días) de los hormigones de las dos fases nos señala que, en general, las resistencias a largo plazo son peores en hormigones con curado al vapor que en hormigones con curado convencional; justamente lo contrario a lo que sucede en edades tempranas.

Así pues, podemos aseverar que los resultados coinciden con los estudios hechos por Poon, Kou y Chan [43]; se obtienen mayores resistencias a compresión en periodos tempranos (1 y 7 días) de los hormigones con áridos reciclados curados al vapor frente a otros tipos de curado. Se confirma que, debido a la mejor hidratación del hormigón, las resistencias a tracción y compresión del hormigón disminuyen con el aumento en el contenido de agregados reciclados pero que se obtienen mejoras considerables en las resistencias a edades tempranas si el curado se efectúa en cámara de vapor. Los resultados para bajas relaciones de a/c son buenos a corto plazo.

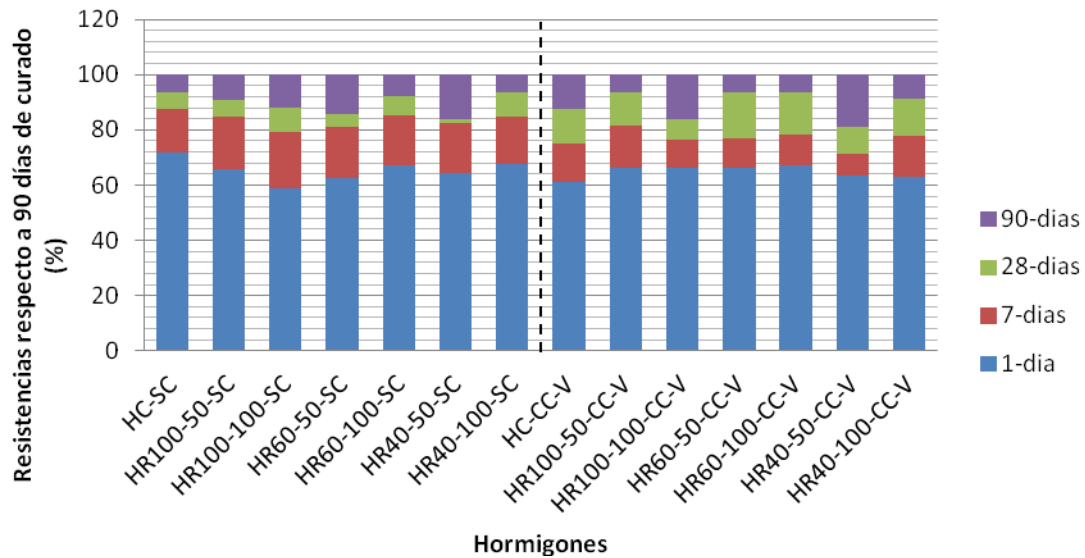


Fig. 52: Comparativa de resistencias en % respecto a 90 días de curado entre hormigones sin cenizas (SC) y hormigones con cenizas y con curado al vapor (CC-V).

Las resistencias a 24h de los hormigones con áridos reciclados (puesto que no es el caso para los HC-SC), cenizas y curado al vapor adquieren un porcentaje del curado respecto a 90 días igual o mayor respecto a sus homónimos sin cenizas y con curado convencional. Sin embargo, a medida que pasan los días, las resistencias de los hormigones sin cenizas y con curado convencional crecen más (y más rápidamente) que los CC-V.

Es oportuno establecer un análisis del crecimiento de las resistencias todos los hormigones CC-V respecto a los hormigones SC:

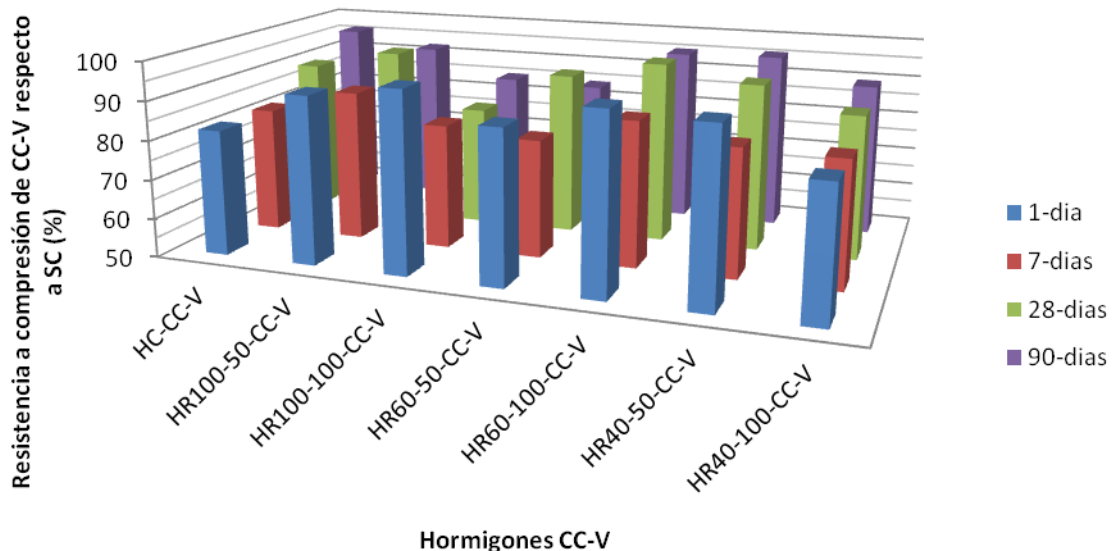


Fig. 53: Comparativa de resistencias de los hormigones CC-V a diferentes edades en % respecto al hormigón SC.

En la figura 53 se pueden establecer visualmente las relaciones (en porcentaje) que hay entre los hormigones con cenizas y curados al vapor y los hormigones sin ceniza y con curados convencionales (ver tablas 14 y 15). Pese a que en ningún momento los CC-V llegan a alcanzar las cotas de resistencia a compresión del SC los resultados nos muestran valores muy altos (todos por encima del 80%), sobre todo a edades tempranas, donde obtenemos un 96,15% del valor del SC en el HR100-100-CC-V, el hormigón con los áridos reciclados de mayor calidad.

El análisis de los anteriores resultados nos muestra que, para edades tempranas, compensa la utilización de cenizas para el ahorro de cemento, siempre que sea mediante curado al vapor, puesto que las resistencias son similares – especialmente cierto en el caso del HR100-100 - a los hormigones sin cenizas. Las resistencias adquiridas mediante el curado al vapor son muy superiores a los hormigones con ceniza y curado convencional para dichos periodos tempranos.

A medida que el tiempo avanza, las resistencias que más crecen son las de los hormigones sin cenizas seguidas muy de cerca por los hormigones con cenizas y curado convencional. Para los hormigones con peor calidad de áridos (HR60 y HR40) los valores se mantienen muy igualados con los hormigones SC, estando los CC con curado convencional por encima de los CC-V.

Se puede establecer que el curado a vapor es imprescindible en hormigones con áridos reciclados y sustitución de cenizas para obtener resistencias significativas en periodos tempranos. Sin embargo, el curado al vapor no se plantea como la mejor opción para los mismos hormigones si se requieren mejores resistencias a largo plazo, aunque los resultados obtenidos siguen siendo adecuados.

Otra relación que se puede establecer a raíz de los resultados obtenidos es que el curado al vapor funciona mejor sobre áridos reciclados que sobre áridos naturales, mejorando la resistencia sobre todo en periodos iniciales. Esto es debido a la baja relación a/c de los hormigones con áridos reciclados, a la buena hidratación proporcionada por el curado al vapor y a las propiedades comentadas anteriormente.

En general el mejor comportamiento lo obtenemos del HR100. La calidad superior de los áridos lo sitúa como la mejor de las opciones para ser utilizado en la construcción (frente al HR60 y al HR40, el más inestable de todos).

5.1.2.- Resistencia a tracción indirecta

Se ensayaron probetas cilíndricas de 20x10 cm a 28 días de edad. En la tabla 16 se describen los resultados obtenidos de la media de tres probetas.

Tabla 16: Resultados tracción indirecta

| Hormigones | Tracción indirecta (MPa) |
|----------------|--------------------------|
| HC-CC | 4,53 |
| HC-CC-V | 4,56 |
| HR100-50-CC | 4,86 |
| HR100-50-CC-V | 4,38 |
| HR100-100-CC | 4,78 |
| HR100-100-CC-V | 5,16 |
| HR60-50-CC | 4,74 |
| HR60-50-CC-V | 4,05 |
| HR60-100-CC | 4,47 |
| HR60-100-CC-V | 4,56 |
| HR40-50-CC | 5,09 |
| HR40-50-CC-V | 4,66 |
| HR40-100-CC | 3,94 |
| HR40-100-CC-V | 4,63 |

Se puede ver que los hormigones fabricados con árido reciclados procedentes de hormigones de 100MPa de resistencia, obtuvieron en general la mayor resistencia. También se puede apreciar que los hormigones curados en vapor alcanzaron en general resistencias inferiores a los hormigones curados en cámara húmeda, probablemente debido a una mayor porosidad en los hormigones sometidos a cámara de vapor [45]. Sin embargo los hormigones fabricados con 100% de árido reciclado (curando en vapor) obtienen mejores resistencia que los hormigones fabricados con 50% de árido reciclado. Y la mayoría de los hormigones fabricados con 100% de árido reciclado superaron la resistencia del hormigón convencional. Sin embargo en los hormigones curados en la cámara húmeda, los hormigones fabricados con 100% de árido reciclado obtuvieron menores resistencias.

En la figura 56 se puede ver la relación de la resistencia a tracción indirecta de cada uno de los hormigones respecto al del hormigón convencional. Se puede apreciar que la mayoría de los hormigones alcanza la resistencia del hormigón convencional.

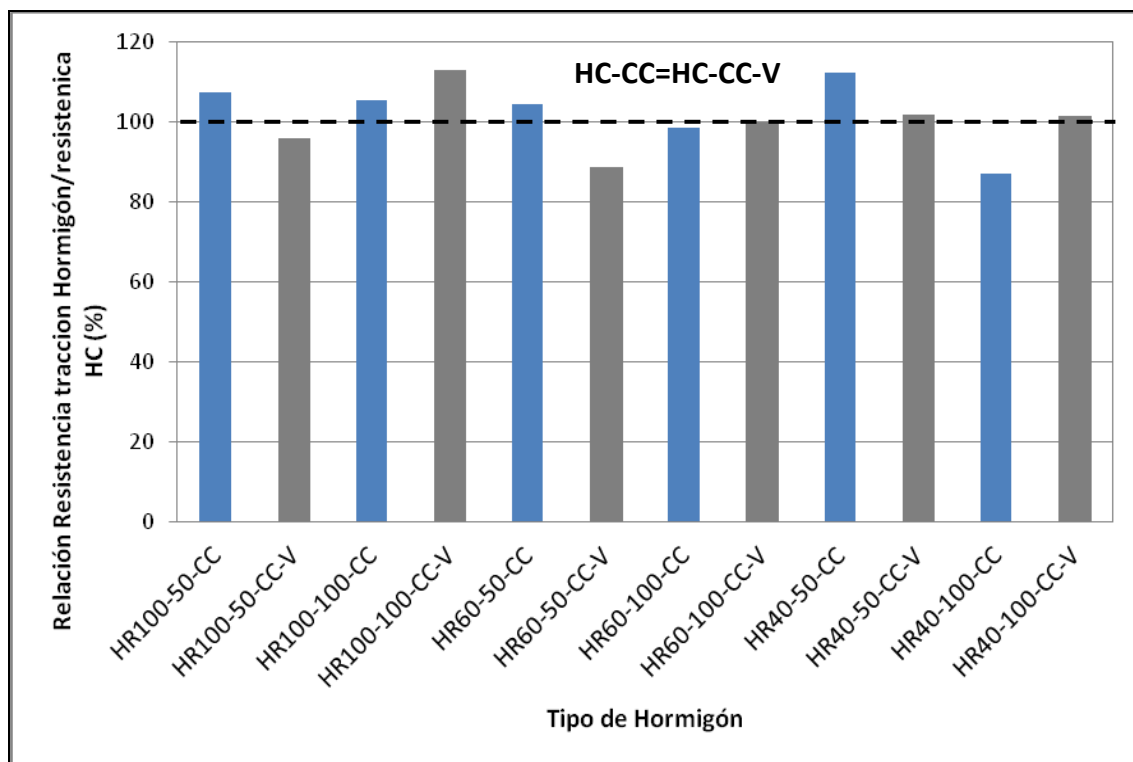


Figura 54: Resultados tracción indirecta en la Fase 1 y 2

Como se trata de valores muy cercanos no se observan tendencias claras y que se trata de una propiedad poco influenciada por la calidad y sustitución de los áridos.

En hormigones con sustitución del árido reciclado del 100% se observa una influencia clara de la calidad del árido, ya que es superior al hormigón con una sustitución del árido reciclado del 50%.

5.1.3.- Modulo de elasticidad

Se ensayaron probetas cilíndricas de 20x10 cm a 28 días de edad. En la tabla 17 se describen los resultados obtenidos de la media de tres probetas.

En la tabla 17, se puede ver la relación del módulo de elasticidad de cada uno de los hormigones respecto del hormigón convencional fabricados con el mismo tipo de cemento.

Tabla 17: Resultados Módulo de elasticidad

| Hormigones | Módulo de elasticidad (MPa) |
|----------------|-----------------------------|
| HC-CC | 44425 |
| HC-CC-V | 46575 |
| HR100-50-CC | 43125 |
| HR100-50-CC-V | 42067 |
| HR100-100-CC | 42545 |
| HR100-100-CC-V | 43903 |
| HR60-50-CC | 43582 |
| HR60-50-CC-V | 39536 |
| HR60-100-CC | 39490 |
| HR60-100-CC-V | 39797 |
| HR40-50-CC | 40990 |
| HR40-50-CC-V | 39898 |
| HR40-100-CC | 35338 |
| HR40-100-CC-V | 37698 |

Tal y como era de esperar, a mayor cantidad de árido reciclado el módulo elásticos fue menor, y tanto más apreciable era esta diferencia cuando el árido reciclado utilizado tenía peor calidad. La reducción del módulo elástico de los hormigones fabricados con áridos reciclados de 100MPa fue inferior al 5%.

Todos los hormigones fabricado con 100% de árido reciclado alcanzaron valores inferiores a los hormigones fabricados con 50% de árido reciclado cuando fueron curados en cámara húmeda, ya que el modulo elástico es proporcional a la densidad del árido. La introducción del árido reciclado menos densos que el árido natural disminuye el modulo del árido reciclado.

En la figura 57 se puede observar de forma comparativa los resultados de los hormigones reciclados que se expresan en porcentaje respecto el hormigón convencional. Las líneas discontinuas marcan el 100% correspondiente al hormigón convencional curado en la cámara húmeda y el 104% correspondiente al hormigón convencional curado en la cámara de vapor.

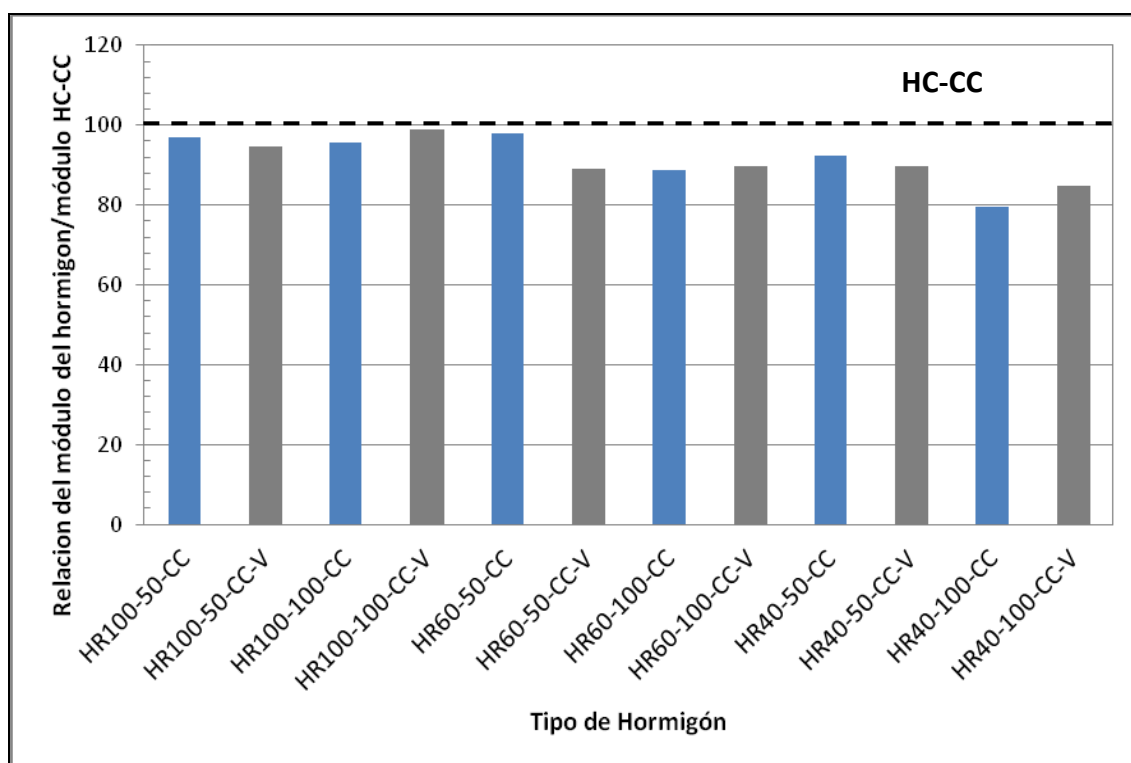


Figura 55: Resultados módulo de elasticidad de la Fase 1 y 2

En los resultados de la tabla 17, obtenidos en la fase 1, se observa que las probetas fabricadas con áridos naturales presentan valores mayores que las fabricadas con áridos reciclados y se observa como a medida que se sustituye mayor porcentaje por árido reciclado los valores disminuyen. La introducción de áridos reciclados menos densos que el árido natural disminuye el modulo del hormigón con árido reciclado [50].

Los hormigones fabricados con árido reciclado de 100MPa presentaron los mayores valores mientras que los hormigones fabricados con áridos reciclado de 40MPa presentaron los valores inferiores. Ninguno de los hormigones llega alcanzar al hormigón convencional con una diferencia del 20% en los valores inferiores.

5.2.- Propiedades físicas

5.2.1.- Resultados densidad, absorción y poros accesibles

La densidad de los hormigones se determinó ensayando probetas cúbicas de 10X10 cm. En la tabla 18 se pueden ver los valores de las densidades de cada uno de los hormigones fabricados.

Tabla 18: Resultados densidad

| Hormigón | Absorción | Densidad Seca | Volumen de poros acc.(%) |
|-----------------|-----------|---------------|--------------------------|
| HC-CC | 1.68 | 2.42 | 5.17 |
| HC-CC-V | 1.93 | 2.46 | 4.13 |
| HR-100-50-CC | 2.14 | 2.42 | 5.17 |
| HR-100-50-CC-V | 2.35 | 2.38 | 5.58 |
| HR-100-100-CC | 2.66 | 2.37 | 6.30 |
| HR-100-100-CC-V | 1.86 | 2.42 | 4.50 |
| HR-60-50-CC | 2.25 | 2.39 | 5.39 |
| HR-60-50-CC-V | 1.88 | 2.40 | 4.53 |
| HR-60-100-CC | 2.40 | 2.36 | 5.67 |
| HR-60-100-CC-V | 2.23 | 2.36 | 5.26 |
| HR-40-50-CC | 2.20 | 2.39 | 5.25 |
| HR-40-50-CC-V | 2.41 | 2.41 | 5.80 |
| HR-40-100-CC | 2.25 | 2.36 | 5.31 |
| HR-40-100-CC-V | 2.06 | 2.37 | 4.87 |

Debido al mortero adherido en los áridos reciclados se observa como la densidad seca disminuye al aumentar el porcentaje de sustitución del hormigón.

En la siguiente figura se establece una comparativa en porcentaje de la relación entre los valores obtenidos en los hormigones fabricados con una sustitución de áridos reciclados respecto al hormigón convencional.

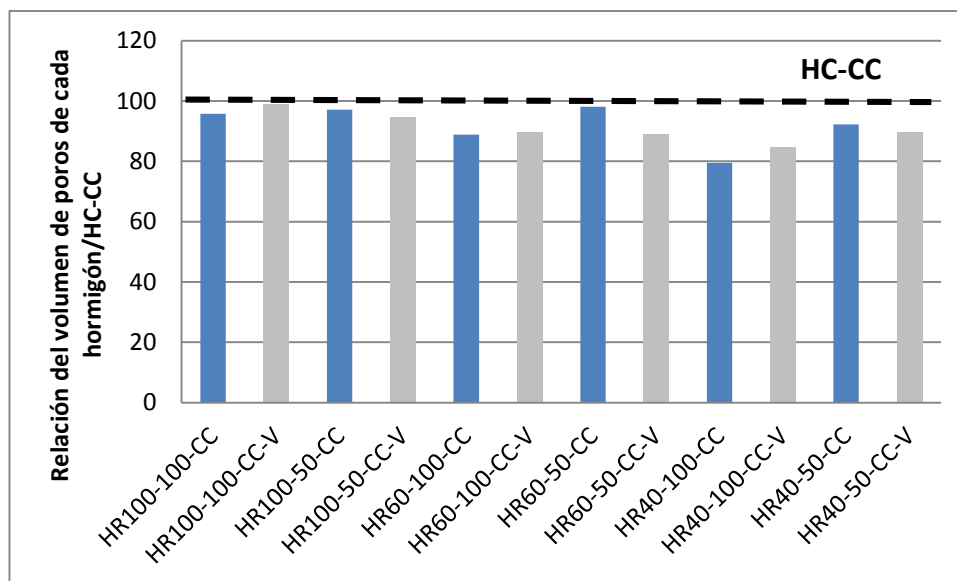


Figura 56: Resultados volumen de poros

En la figura 58, se observa que el volumen de poros accesibles de los hormigones con sustitución de áridos reciclados obtiene porcentajes cercanos a los del hormigón convencional. En cualquier caso los resultados están todos por debajo de dicho valor de referencia. En general se puede apreciar una disminución de la porosidad cuando el curado se efectúa en cámara de vapor. Los valores que difieren de esta premisa son el HR100-100, el HR40-50 y el HR60-100 (aunque en este caso el valor es casi el mismo). Se debe establecer un análisis más complejo mediante otros ensayos (apartado 5.3.4. Análisis MIP) para determinar exactamente la porosimetría interna de las muestras.

La mala calidad del mortero adherido en los áridos reciclados de 40MPa produce un mayor incremento de volumen de poros. Si estos hormigones están curados en la cámara de vapor este volumen de poros aumenta todavía más este porcentaje de volumen de poros.

5.2.2.- Resultados UPV (Ultrasonic Pulse Velocity)

Las probetas cúbicas son extraídas de la cámara húmeda a los 28 días y se dispone a la realización del ensayo, mediante un PUNDIT (Portable Ultrasonic Nondestructive Digital Indicating Tester) previamente calibrado, como se explica anteriormente es un ensayo no destructivo.

En la tabla 19 se puede ver los resultados de cada uno de los hormigones fabricados.

Tabla 19: Resultados UPV

| Hormigones | Resultado saturado (m/s) |
|-----------------|--------------------------|
| HC-CC | 5079 |
| HC-CC-V | 5125 |
| HR-100-50-CC | 5204 |
| HR-100-50-CC-V | 5094 |
| HR-100-100-CC | 5055 |
| HR-100-100-CC-V | 5292 |
| HR-60-50-CC | 5032 |
| HR-60-50-CC-V | 5068 |
| HR-60-100-CC | 4899 |
| HR-60-100-CC-V | 4965 |
| HR-40-50-CC | 5071 |
| HR-40-50-CC-V | 5035 |
| HR-40-100-CC | 4847 |
| HR-40-100-CC-V | 4826 |

Los hormigones se encuentran dentro del margen de calidad excelente, ya que todos los valores superan el 4500 m/s, tal como se especifica en la tabla 19.

Los hormigones fabricados con una sustitución de árido reciclado del 100% con una resistencia de 60MPa y 40MPa, sufren una reducción del UPV respecto los hormigones fabricados con una sustitución de árido reciclado del 50%, tanto lo curados en la cámara húmeda como los que han sido curados en cámara de vapor.

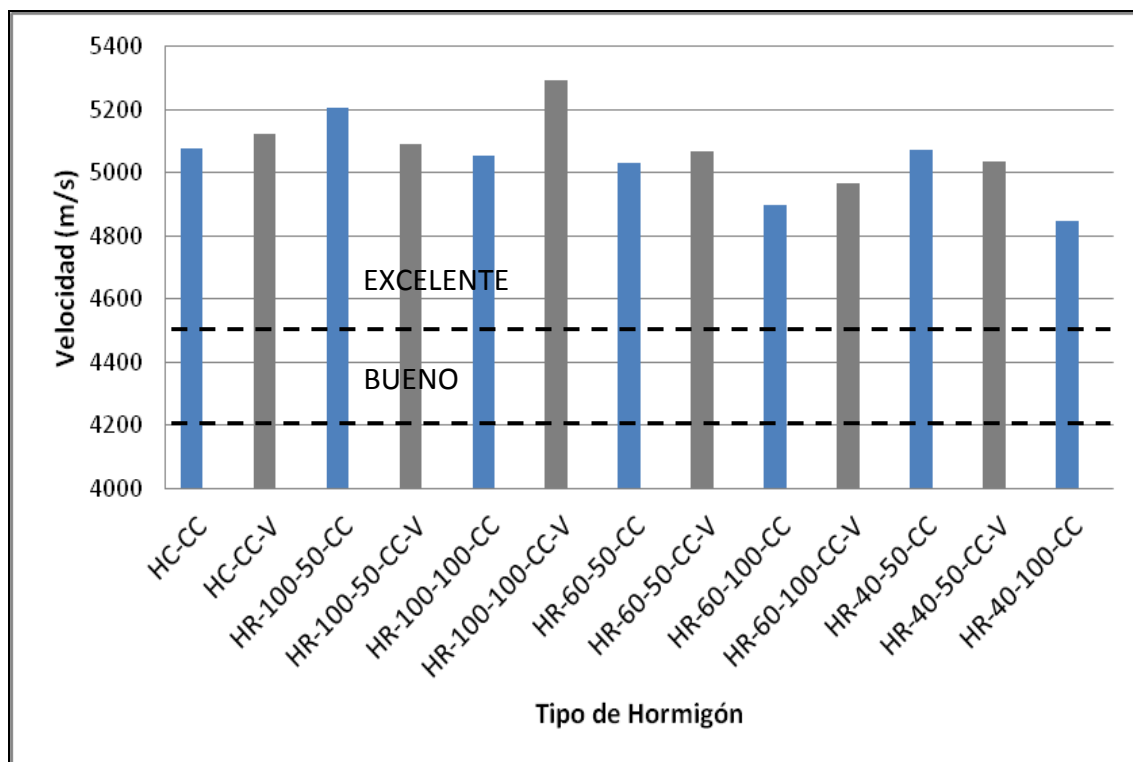


Figura 57: Resultados UPV

En la figura 59, se observa que los hormigones con una sustitución de árido reciclado del 100% obtienen mejor calidad si fueron curados en la cámara de vapor, en cambio los hormigones con una sustitución de árido reciclado del 50% obtienen mejor calidad curados en la cámara húmeda, superando al convencional en los dos casos.

La velocidad disminuye a medida que el nivel de sustitución del árido reciclado por árido natural aumenta. El hormigón con una sustitución de 100% de árido reciclado de 100MPa curado en la cámara de vapor alcanza el mejor UPV.

5.3.- Durabilidad

5.3.1.- Resultados ensayo succión capilar

El ensayo se realizó en probetas cúbicas de 10x10 cm a los 28 días de edad. Tal y como se ha descrito en el capítulo anterior, las caras laterales de las probetas fueron impermeabilizadas y una vez sumergidas en agua la cara inferior se toman las medidas a 10, 30, 60, 90 y 120 minutos y posteriormente a 6, 24 y 72 horas.

A continuación se muestra la evolución de la absorción de agua por los hormigones.

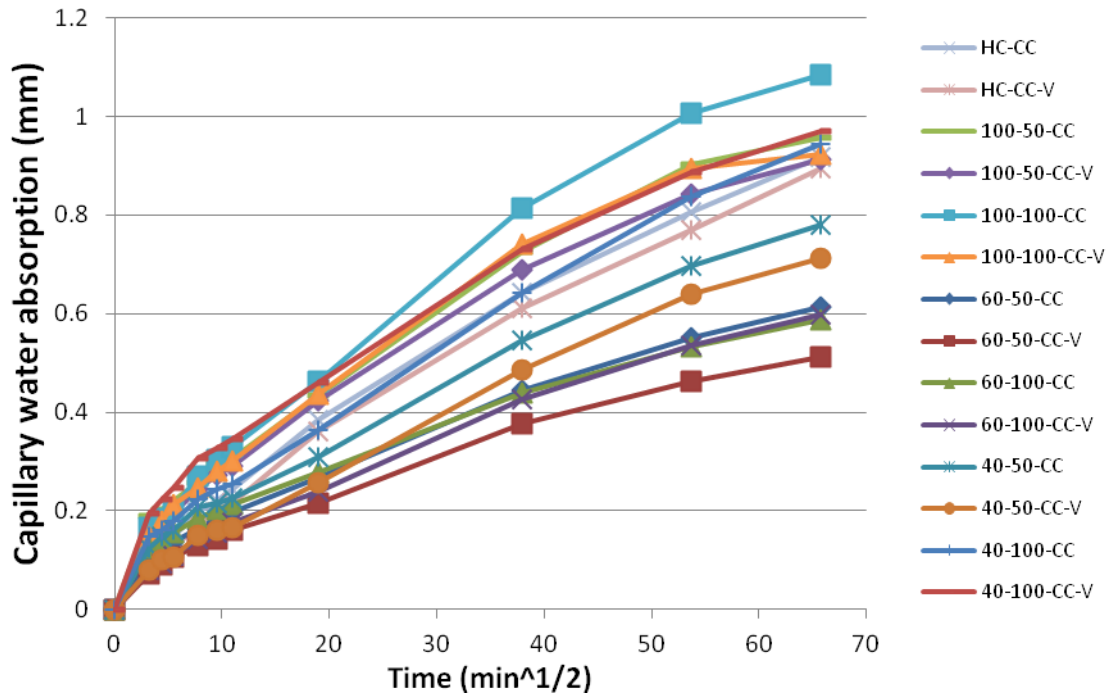


Figura 58: Evolucion de la absorcion del agua por los hormigones

Se observa en la figura 60 como las curvas tienen mayor pendiente al inicio debido a la saturación de las probetas que se produce a medida que avanza el proceso. De los valores obtenidos se observa que a los hormigones con menor sustitución de árido reciclado presenta una menor succión.

En la siguiente tabla se recoge las líneas de tendencia y los coeficientes de succión determinados para cada tipo de hormigón.

Tabla 20: Coeficiente de succión capilar

| Hormigón | Línea de tendencia | Coeficiente de succión (mm/min ^{0.5}) |
|-----------------|--------------------|---|
| HC-CC | $y=0,022x+0,015$ | 0,022 |
| HC-CC-V | $Y=0,019x+0,008$ | 0,019 |
| HR-100-50-CC | $Y=0,025x+0,061$ | 0,025 |
| HR-100-50-CC-V | $Y=0,025x+0,035$ | 0,025 |
| HR-100-100-CC | $Y=0,027x+0,048$ | 0,027 |
| HR-100-100-CC-V | $Y=0,025x+0,043$ | 0,028 |
| HR-60-50-CC | $y=0,016x+0,03$ | 0,016 |
| HR-60-50-CC-V | $Y=0,013x+0,019$ | 0,013 |
| HR-60-100-CC | $Y=0,017x+0,039$ | 0,017 |
| HR-60-100-CC-V | $Y=0,015x+0,018$ | 0,015 |
| HR-40-50-CC | $Y=0,019x+0,038$ | 0,019 |
| HR-40-50-CC-V | $Y=0,014x+0,021$ | 0,015 |
| HR-40-100-CC | $y=0,021x+0,045$ | 0,021 |
| HR-40-100-CC-V | $Y=0,029x+0,061$ | 0,029 |

Los hormigones fabricados con menor porcentaje de árido reciclado fueron los que presentaban unos coeficientes de absorción menores. A medida que se sustituyeron mayor porcentaje de árido reciclado estos coeficientes aumentaron. Todos los hormigones con una sustitución del 100% de árido reciclado alcanzaron valores mayores que los hormigones con una sustitución del 50% de árido reciclado. No se apreció diferencia en los valores del coeficiente de succión para diferentes métodos de curado.

5.3.2.- Resistencia a la penetración de los iones cloruros

El ensayo se realizó a la edad de 28 días de curado del hormigón. En la tabla 21 se puede observar el valor de la carga que provoca el paso de los iones cloruros en el hormigón.

Tabla 21: Resultados carga eléctrica según la topología del hormigón

| Hormigones | Carga eléctrica (C) |
|----------------|---------------------|
| HC-CC | 850 |
| HC-CC-V | 639 |
| HR100-50-CC | 960 |
| HR100-50-CC-V | 774 |
| HR100-100-CC | 918 |
| HR100-100-CC-V | 582 |
| HR60-50-CC | 1233 |
| HR60-50-CC-V | 1016 |
| HR60-100-CC | 1445 |
| HR60-100-CC-V | 1008 |
| HR40-50-CC | 1457 |
| HR40-50-CC-V | 1282 |
| HR40-100-CC | 1692 |
| HR40-100-CC-V | 1397 |

Los hormigones convencionales presentaron una alta resistencia a la penetración de cloruros, siendo el hormigón convencional curado en la cámara de vapor el que mejor resistencia presentó. Sin embargo el hormigón que mejor resistencia presentó entre todos los hormigones fue el hormigón con una sustitución del 100% de árido reciclado de 100MPa de resistencia y curado en la cámara de vapor.

En este ensayo también se apreció que los hormigones fabricados con 100% de árido reciclado y curado en la cámara de vapor trabajaba mucho mejor que los hormigones fabricados en la cámara húmeda. Asimismo, los hormigones con 100% de sustitución de árido reciclado trabajan también mucho mejor que aquellos con un porcentaje del 50%.

A medida que sustituimos el árido natural por el árido reciclado es más fácil el paso de los iones cloruros. Por lo tanto la durabilidad será menor, ya que pasaran más iones.

En la figura 61 podemos observar el valor de la carga eléctrica para cada tipo de hormigón.

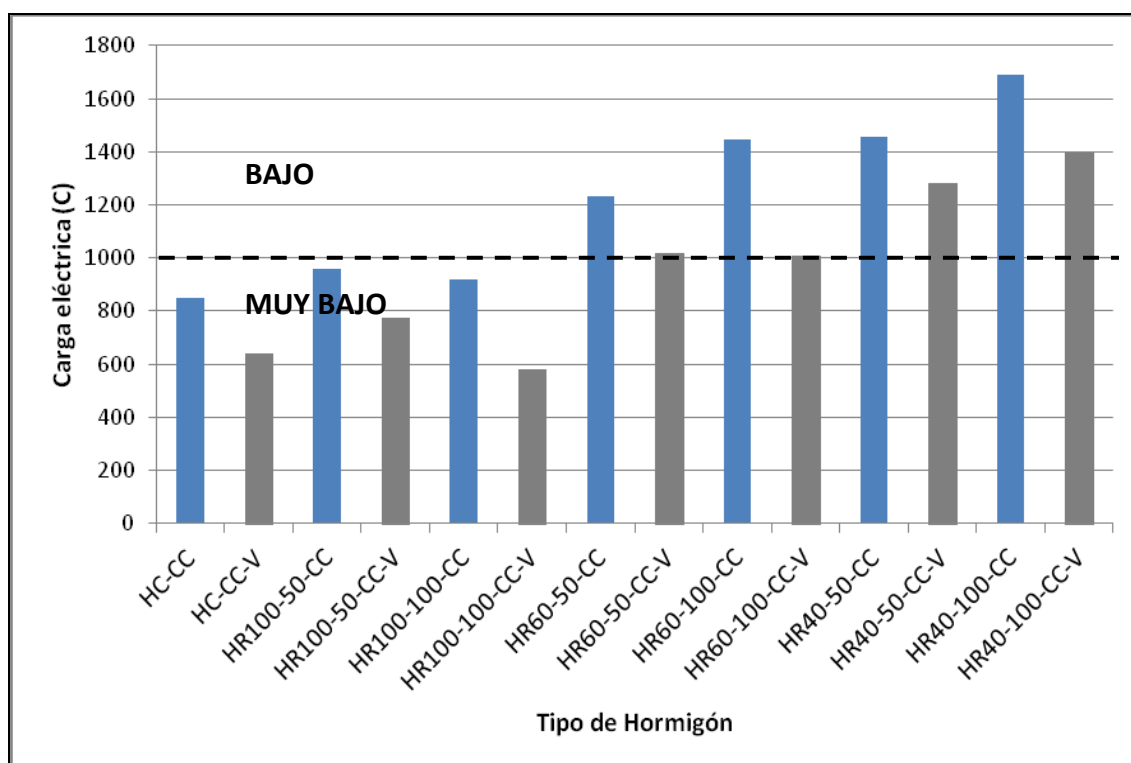


Figura 59: Resultados carga eléctrica

De acuerdo a la clasificación del ASTM(1202) todos los hormigones presentan una penetración de cloruros bajo o muy bajo, siendo tal y como se puede apreciar los hormigones fabricados con árido reciclado de 40MPa los que obtuvieron la menor resistencia a la penetración.

5.3.4.- Análisis MIP (Mercury Intrusion Porosimetry)

La alta tensión superficial propia del mercurio impide que éste moje la superficie en la que se encuentra, impidiendo que penetre en los poros por capilaridad. Precisamente debido a sus características, el mercurio solo penetrará mediante la aplicación de una fuerte presión exterior. La porosimetría del mercurio se basa en la inyección gradual a altas presiones de mercurio líquido en un sistema de poros previamente evacuados. En general, el aumento de la presión hace que hasta los poros más pequeños sean accesibles al mercurio.

Se han efectuado los ensayos a 24h (1) y a 28 días (2).

A continuación se muestran una tabla con los resultados de la porosidad (%) y el diámetro medio del poro (μm) y el diagrama que representa los resultados del análisis del MIP para los hormigones convencionales.

Tabla 22: Resultados del MIP según la topología del hormigón

| Hormigones | Porosidad (%) | Diámetro medio del poro (μm) | Porosidad (%) | Diámetro medio del poro (μm) |
|----------------|---------------|---|---------------|---|
| | 24 horas | | 28 días | |
| HC-SC | 6,78 | 0.0440 | 5,23 | 0.0480 |
| HC-CC | 7,48 | 0.0469 | 5,46 | 0.0389 |
| HC-SC-V | 7,92 | 0.0355 | 5,63 | 0.0239 |
| HC-CC-V | 8,52 | 0.0469 | 6,93 | 0.0198 |
| HR100-100-SC | 8,71 | 0.0600 | 4,51 | 0.0604 |
| HR100-100-CC | 7,63 | 0.0361 | 5,07 | 0.0340 |
| HR100-100-SC-V | 5,62 | 0.0357 | 5,61 | 0.0312 |
| HR100-100-CC-V | 7,90 | 0.0345 | 4,90 | 0.0236 |

MIP HCs

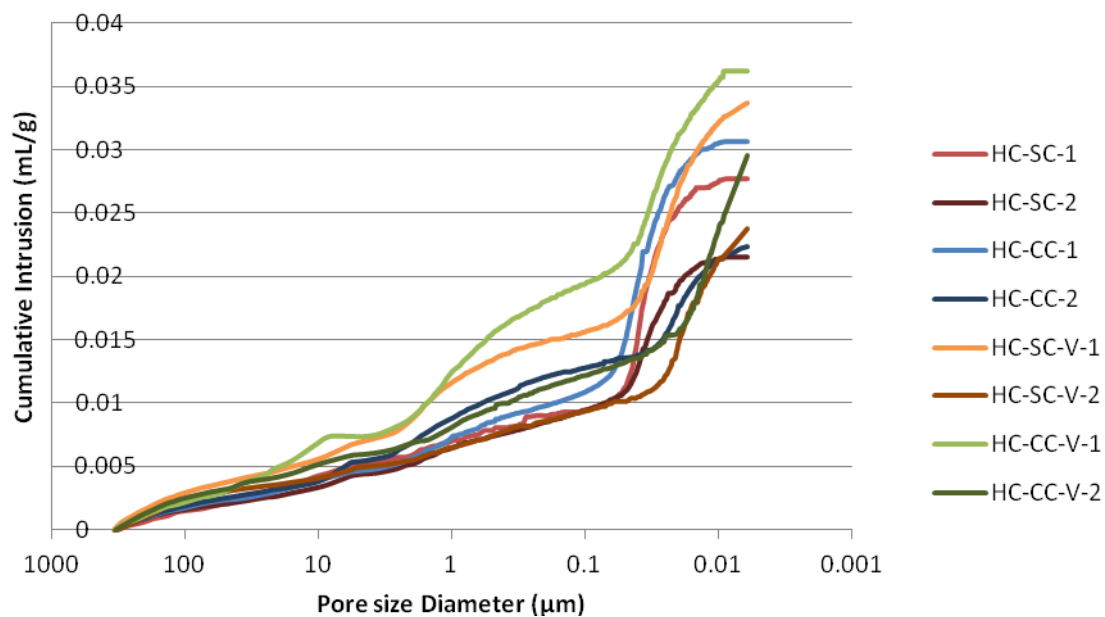


Figura 60: Diagrama de MIP para HC

Las lecturas observadas por la intrusión de mercurio denotan un mayor volumen de poros accesibles en los hormigones convencionales tras un periodo de curado inicial de 24h (SC-1, CC-1, SC-V-1, CC-V-1). Asimismo, el gráfico nos muestra un volumen de poros muy alto en el hormigón con cenizas y con curado al vapor. Pese a que la porosidad superficial es relativamente baja (en comparación al resto de hormigones), a partir de los $50\mu\text{m}$ el volumen de poros se dispara y muestra además tamaños irregulares de poros.

Por otra parte, es interesante notar que el mismo hormigón, a 28 días tiene, en general, unos valores de porosidad mucho más bajos que el resto de hormigones.

Lo mismo sucede con el hormigón sin cenizas y con curado a vapor (HC-SC-V-1). Tiene unos valores de porosidad altos a 24h pero su valor a 28 días es el más bajo.

El resultado más destacado del análisis es que a 28 días el curado de vapor tiene menos volumen de poros accesibles, tal y como se venía anunciando en el apartado de propiedades físicas (figura 50).

¿Cómo influyen los áridos reciclados sobre la porosimetría? En las figuras presentadas a continuación se representan los valores obtenidos tras el ensayo del MIP.

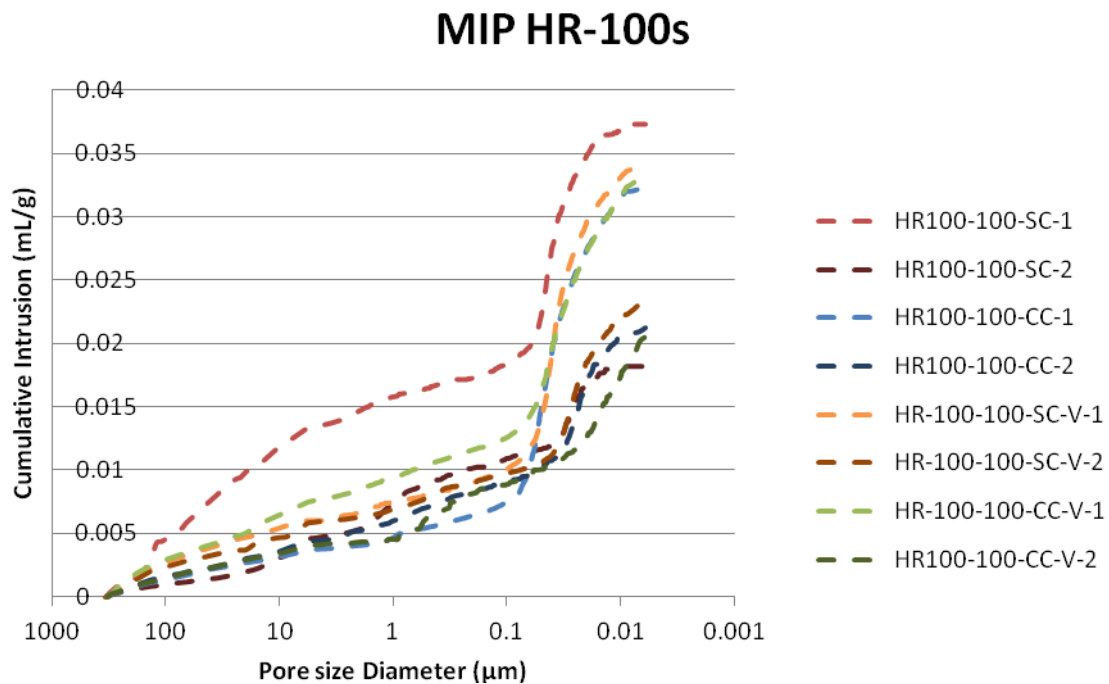


Figura 61: Diagrama de MIP para HR

En los hormigones con áridos reciclados el efecto del tiempo de curado es aún más marcado. Se puede observar que el árido con mayor índice de poros dentro del rango de la figura 63 es el HR100-100-SC-1. Sin embargo, la porosimetría presentada no es tan continua como su homólogo curado a 28 días. En general se observa la misma diferencia entre las muestras curadas a 24h y las muestras curadas a 28 días.

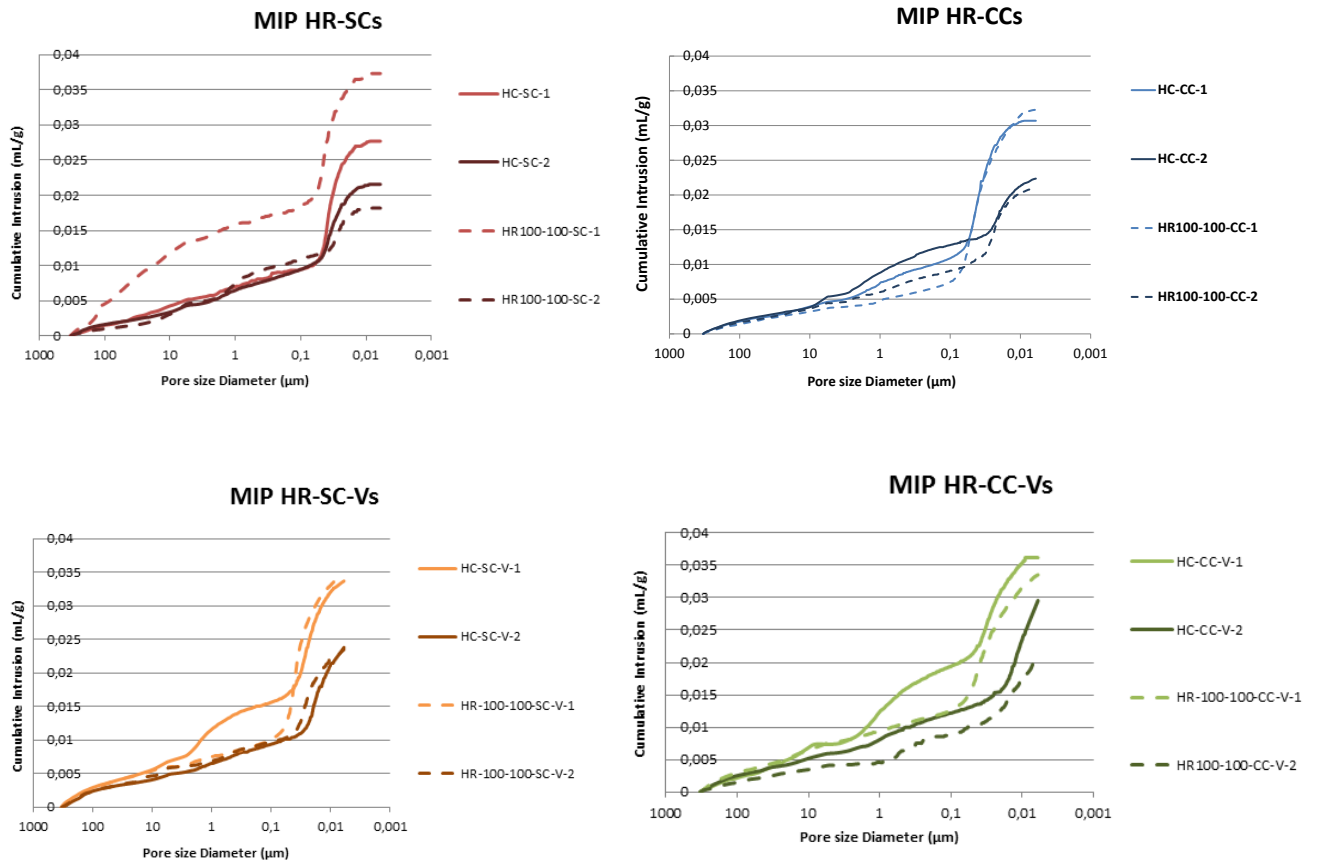


Figura 62: Comparativa entre HC y HR (SC-CC-V)

La comparativa establecida entre los HC y los HR nos muestra que los HR presentan menor porosidad si estos incluyen cenizas volantes. La porosidad aún disminuye más cuando el curado de los mismos hormigones es realizado en cámara de vapor. Por otra parte, en los hormigones sin cenizas los que presentan mayor porosidad son justamente los hormigones con áridos reciclados.

Los resultados entran en contradicción con los análisis efectuados por C. Thomas, J. Setién et al. [52], quienes postulan que para relaciones bajas de a/c en hormigones, la baja porosidad de la nueva pasta es predominante, así que se retrasa el avance de los agentes agresivos, obteniendo un comportamiento similar a los hormigones convencionales por parte de los hormigones reciclados. Esto no sucede de tal manera según los resultados obtenidos. Si bien es cierto que las cenizas hacen disminuir el volumen de poros y estabilizan la dimensión de los mismos se puede observar cómo, en general, la porosidad de los hormigones reciclados es superior a la de los hormigones convencionales (fig. 64). Esto es precisamente debido a la baja relación a/c que encontramos en los hormigones con áridos reciclados, donde hay una clara predominancia de los áridos. Estos últimos resultados obtenidos concuerdan con el análisis efectuado con MIP por Q. Zeng, K. Li et al. sobre diferentes hormigones con cenizas volantes [53].

5.3.5.- Resistividad eléctrica

Esta propiedad se determinó a los 28 días de edad de cada uno de los hormigones. El resultado expresada en la tabla 22, es la media de tres valores.

A partir de los valores de la resistencia medida, la superficie de contacto y la distancia entre placas metálicas se deduce la resistividad eléctrica de cada hormigón.

Los resultados se muestran en la tabla 22 y se representan en la figura 54 siguiente.

Tabla 23: Resultados resistividad eléctrica

| Hormigones | Resistividad saturado ($\Omega \cdot \text{cm}$) |
|-----------------|--|
| HC-CC | 66644, |
| HC-CC-V | 66666 |
| HR-100-50-CC | 66733 |
| HR-100-50-CC-V | 66911 |
| HR-100-100-CC | 46870 |
| HR-100-100-CC-V | 46666 |
| HR-60-50-CC | 33322 |
| HR-60-50-CC-V | 33333 |
| HR-60-100-CC | 26172 |
| HR-60-100-CC-V | 27371 |
| HR-40-50-CC | 30177 |
| HR-40-50-CC-V | 30168 |
| HR-40-100-CC | 23185 |
| HR-40-100-CC-V | 20756 |

Se observa que los hormigones convencionales presentaron un riesgo menos elevado que los hormigones reciclados, debido a la naturaleza de los áridos, ya que tienen una conductividad más elevada que la pasta de cemento.

En la figura 57 se puede apreciar según la resistividad eléctrica en que riesgo se clasifica cada tipo de hormigón.

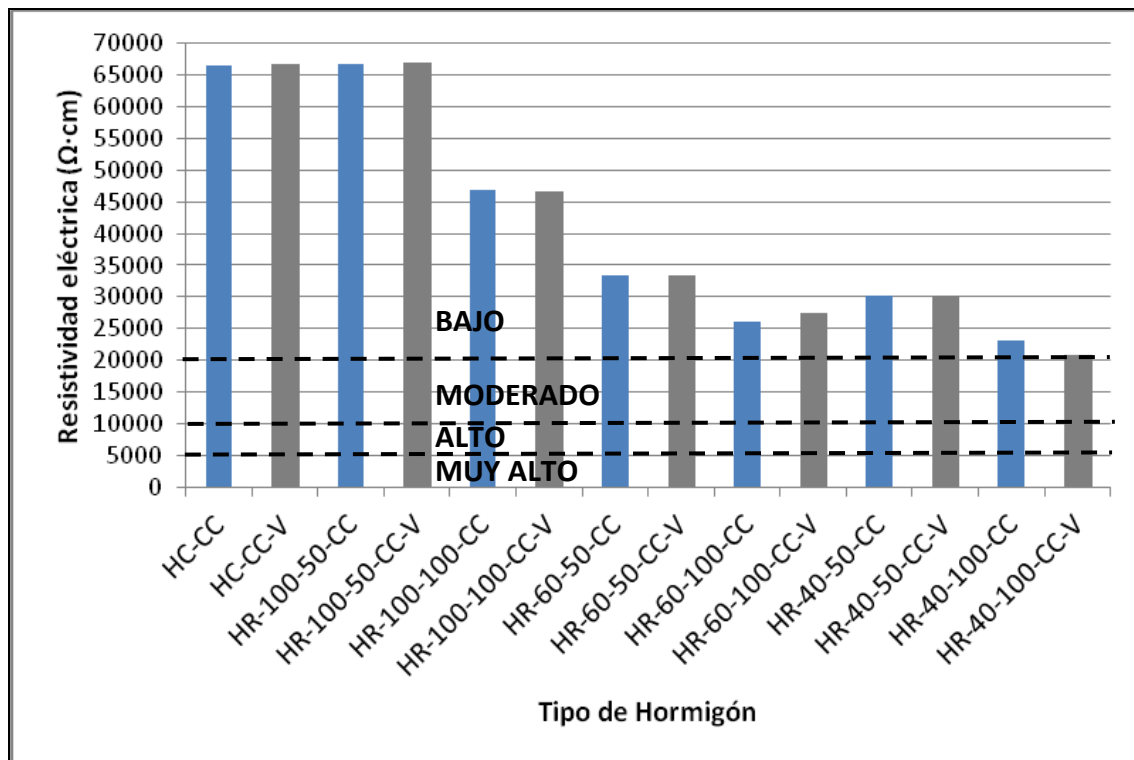


Figura 63: Resultados resistividad eléctrica

Si se analizan los resultados de forma gráfica, cuando las probetas se encuentran saturadas se observa que los hormigones mejoran su resistividad eléctrica, dando valores dentro del rango de bajo, según los valores propuestos por P. Langford y J. Broomfield [44].

De los hormigones estudiados se puede concluir que el hormigón con una sustitución del 50% de árido reciclado de 100MPa tendrá un riesgo más bajo por ataque de cloruros, ya que a medida que aumentamos el porcentaje de sustitución de árido reciclado, estos valores son más pequeños, por lo tanto hay más riesgo.

6.- Conclusiones

Acabado todo el estudio, en este apartado se recogerán y explicarán cuales son las conclusiones que se han obtenido finalmente, comparando para ello las propiedades de los hormigones reciclados con respecto a los hormigones convencionales, teniendo en cuenta el nivel de sustitución y la calidad del árido reciclado. Por otro lado se analizarán las conclusiones obtenidas respecto a la influencia de los diferentes tipos de curados y del tipo de cemento.

Finalmente se propondrán algunas futuras líneas de investigación en el mismo ámbito de trabajo.

6.1.- Conclusiones

6.1.1.- Propiedades mecánicas del hormigón endurecido

Compresión simple

- En todas las edades, se observa una influencia negativa por la disminución de calidad original del hormigón de dichos áridos. El uso de árido reciclado de hormigón de 100 MPa no presenta diferencias respecto al hormigón convencional, ya que se trata de árido de la misma calidad que el nuevo hormigón.
- El nivel de sustitución de los áridos naturales afecta negativamente a edades tempranas y con curado convencional. Sin embargo, usando curado de vapor la influencia de las sustituciones se minimiza debido a una mejora en el sistema de porosidades.
- A edades mayores, la influencia de las sustituciones se invierte cuando se usan áridos de más de 60MPa y curados en vapor, llegando a superar a 90 días los valores del hormigón convencional. Este hecho indica que el curado en vapor tiene mayores efectos sobre los hormigones con árido reciclado, siempre que las resistencias de los áridos no difieran mucho del nuevo hormigón.
- El uso del curado al vapor aumenta significativamente las resistencias iniciales pero éstas tienen un crecimiento menor a lo largo del tiempo respecto al mismo tipo de hormigones con curado convencional.
- El análisis de los anteriores resultados muestra que, para edades tempranas, la utilización de cenizas compensa para el ahorro de cemento, siempre que sea mediante curado al vapor, puesto que las resistencias son similares a los hormigones sin cenizas.

Tracción indirecta

- No se observa una influencia clara de la calidad del árido o del tipo de curado. Los hormigones fabricados con árido reciclados procedentes de hormigones de 100MPa de resistencia son los que obtienen, en general, la mayor resistencia a tracción indirecta. El contacto entre pastas de la misma calidad y la mayor porosidad del árido reciclado respecto al árido natural generan una interfase de alta calidad.
- Los hormigones fabricados con 100% de árido reciclado curado en la cámara de vapor obtienen mejores resistencias a tracción indirecta que los hormigones fabricados con 50% de árido reciclado. Sin embargo, en hormigones curados en la cámara húmeda, los hormigones fabricados con 100% de árido reciclado obtienen menores resistencias que los hormigones con un 50% de sustitución.

Módulo de elasticidad

- Los hormigones fabricados con áridos naturales presentan valores mayores que los fabricados con áridos reciclados y se observó como a medida que se sustituía un mayor porcentaje por árido reciclado los valores disminuían. Es más apreciable esta diferencia cuando el árido reciclado utilizado tiene una calidad inferior porque la diferencia en la densidad entre los áridos gruesos se acentúa; es ahí donde radica la principal diferencia.

6.1.2.- Propiedades físicas hormigón endurecido

Densidad, absorción y poros accesibles

- A medida que se sustituyó mayor porcentaje de árido reciclado para la fabricación del hormigón, la densidad disminuyó. Este hecho se debió a la propia densidad inferior de los áridos reciclados respecto los áridos naturales.
- El volumen de poros accesibles de los hormigones con sustitución de áridos reciclados obtuvo porcentajes similares al del hormigón convencional. Se intuye una mejora al aumentar el porcentaje de árido reciclado del 50% al 100% para los casos en los que se utilizó curado en vapor.

UPV (Ultrasonic Pulse Velocity)

- Los hormigones fabricados con una sustitución de árido reciclado del 100% con una resistencia de 60MPa y 40MPa, sufrieron una reducción del UPV respecto los hormigones fabricados con una sustitución de árido reciclado del 50%, tanto si fue curado en la cámara de vapor como en la cámara húmeda.
- La velocidad de propagación no se vio influenciada por el nivel de sustitución del árido reciclado original de 100MPa. Estos hormigones igualaron o superaron los valores obtenidos por el hormigón convencional.

6.1.3.- Durabilidad del hormigón endurecido

Succión capilar

- Todos los hormigones con una sustitución del 100% de árido reciclado alcanzaron valores mayores que los hormigones con una sustitución del 50% de árido reciclado, independientemente de la calidad del árido. Asimismo, no se apreció diferencia en los valores del coeficiente de succión para diferentes métodos de curado.

Penetración de los iones cloruros

- Todos los hormigones presentan un riesgo de corrosión por penetración de iones cloruro bajo o muy bajo, siendo los hormigones fabricados con árido reciclado de 40MPa los que obtuvieron una resistencia a la penetración de iones cloruro inferior.
- Los hormigones fabricados con 100% de árido reciclado y curado en la cámara de vapor mostraron unos mejores resultados que los hormigones fabricados en la cámara húmeda debido a una mejor red de poros.
- A medida que se aumentó la sustitución del árido natural por el árido reciclado, la facilidad de paso de los iones cloruros a través del hormigón incrementó a partir de resistencias inferiores a 60 MPa. En el caso de árido de 100MPa el uso de hasta una

sustitución del 100% y curado en vapor permitió un menor paso de más iones cloruro que indica la disminución del riesgo de corrosión.

MIP

- Los índices de porosidad a 24h van del 5,6% (HR100-100-SC-V) a 8,7% (HR100-100-SC). Los índices de porosidad a 28 días van de 4,5% (HR100-100-SC) a 6,9% (HC-CC-V). Los resultados muestran un descenso significativo en el HR100-100-SC el cual, sin embargo, es el hormigón con mayor diámetro de poros (0.06 μm a 24h y a 28 días).
- A 24 horas: El volumen de poros del hormigón fabricado con árido natural aumenta significativamente, pese a que disminuye el diámetro medio del poro. El hormigón HR100-100-SC-V obtiene la menor porosidad y menor diámetro del poro. En los CC, apenas hay diferencias respecto al tipo de curado, se puede decir que el HR100-100 funciona mejor que el HC.
- A 28 días: Los HR100-100-SC obtienen menor porosidad que el HC. El curado al vapor aumento un poco la porosidad del árido natural y disminuye el diámetro medio del poro. El HR100-100-CC-V obtiene una porosidad y un diámetro de poros significativamente menor al HC-SC.
- El índice de poros disminuye significativamente en los hormigones reciclados cuando el curado se realiza en la cámara de vapor.
- Los hormigones que presentan mayor porosidad son los hormigones con áridos reciclados y sin cenizas volantes.

Resistividad eléctrica

- Los hormigones convencionales presentaron un menor riesgo que los hormigones reciclados. A pesar de que la naturaleza de los áridos tiene una influencia mayor sobre esta propiedad, ya que tienen una conductividad más elevada que la pasta de cemento. Se observó una clara influencia de la calidad del hormigón en esta propiedad. La realización del ensayo en condiciones saturadas puso de manifiesto que la disminución de la calidad del árido y el incremento de la sustitución del árido natural influye negativamente en la resistividad eléctrica.

6.1.4.- Conclusiones finales

- Se puede concluir que, según el ensayo de compresión, se deduce que a las 24 horas los hormigones curados en la cámara de vapor obtienen mayores resistencias que los hormigones curados en la cámara húmeda. Llegados a los 90 días de curado las resistencias de los hormigones curados en la cámara de vapor muestran una evolución inferior. A pesar de esto, la sustitución de cenizas hasta un 30% y el uso de un 100% árido reciclado de alta calidad puede proporcionar hormigón de altas prestaciones.
- Se deduce que el incremento de la sustitución de áridos reciclados de la misma calidad que el nuevo hormigón proporciona mayores resistencias a partir de 28 días y mejores calidades de durabilidad debido al efecto beneficioso que aportan los áridos al curado en vapor.
- Según los ensayos de durabilidad, el hormigón con sustitución de áridos reciclados de 100MPa da mejores resultados que los hormigones con sustitución de áridos reciclados de 60MPa y 40MPa, observándose una clara disminución de las propiedades a partir del 50% de sustitución del árido de 60MPa.
- Finalmente, teniendo en cuenta las propiedades mecánicas y de durabilidad puede asegurarse que los hormigones con una sustitución total de áridos de resistencias superiores a 60MPa o el uso de un 50% de áridos de esta resistencia pueden

considerarse equiparables al hormigón convencional. Si se tiene en cuenta el aspecto mecánico podría ampliarse el uso hasta un 100% de árido de 60MPa.

- Por lo que afecta al sistema de curado en vapor, los hormigones con un porcentaje de sustitución mayor, y con una calidad similar al nuevo hormigón, parecen tener mejores comportamientos respecto al hormigón convencional en lo que se refiere a resistencia a edades superiores a 28 días y propiedades de durabilidad tales como la penetración de cloruros. Estas mejoras se deben a la formación de redes de poros con diámetros medios de poro y porosidades totales inferiores.

6.2. - Futuras líneas de investigación

Las futuras líneas de investigación que darían continuidad al estudio del hormigón de altas prestaciones con árido reciclado estarían dedicadas a ampliar el estudio con otras propiedades que en este estudio no se han llegado a ensayar. En continuidad con los ensayos de durabilidad, se podrían realizar ensayos de hielo-deshielo, reacciones álcali-árido, carbonatación o retracción. Para su uso en elementos estructurales podrían realizarse ensayos en viga, de adherencia con las armaduras o de fatiga.

También es posible abrir nuevas líneas de investigación para los hormigones de altas prestaciones con árido reciclado pero con diferentes métodos de curado que puedan incrementar aún más las resistencias y mejorar sus propiedades físicas y de durabilidad, como por ejemplo el curado con CO₂ o añadir adiciones de arena metacaolínica para mejorar dichas propiedades.

7.- Bibliografía

7.1.- Bibliografía

- [1] Residuos de construcción y demolición. <http://www.cedexmateriales.vsf.es>
- [2] Miren Etxeberria et al., Grupo de trabajo “Hormigón Reciclado”. Utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural 2003.
- [3] Martín-Morales, M.; Zamorano, M.; Ruiz-Moyano, A.; Valverde-Espinosa, I.: “Characterization of recycled aggregates construction and demolition waste for concrete production following the Spanish Structural Concrete Code EHE-08”. Construction and building materials. (2010). ISSN 0950-0618.
- [4] Hendriks, Ch.: “The Building Cycle”. Aeneas Tech. Pbl. The Netherlands, 2000.
- [5] EHE-08 (Instrucción de Hormigón Estructural).
- [6] Barra, M.: “Estudio de la Durabilidad del Hormigón de Árido Reciclado en su Aplicación como Hormigón Estructural”. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Catalunya. 1996.
- [7] Gonzalez, B.: “Hormigones con Áridos Reciclados Procedentes de Demoliciones: Dosificaciones, Propiedades Mecánicas y Comportamiento Estructural a Cortante”. Tesis doctoral. E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica A Coruña, 2002.
- [8] Sanchez de Juan, M.; Alaejos, P.; Geraldès, V.L. et al.: “Conclusiones sobre reciclado de residuos de construcción y demolición como áridos para hormigones no estructurales”. En publicación. Ihohe, 2010.
- [9] Etxeberria M., Vázquez E., Marí A., Barra M.: “Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete”, Cement and Concrete Research 37 (2007), pp. 735-742.
- [10] TAM V.W.Y., GAO X.F. TAM C.M., Microstructural análisis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach, Cement and Concrete Research 35 (2005) 1195-1203.
- [11] Abdelgadir A., Gholamreza F., O.Burkan I., Benoit F., Simon F., “Durability of recycled aggregate concrete designed with equivalent mortar volume method”, Cement and Concrete Research (2009) 555-563.
- [12] Khaldoun Rahal: “Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate, Bulding and Environment, Volume 42, Issue 1, January 2007, Pages 407-415 (2005).
- [13] L.Butler, J.S. West, S.L. Tighe: “The effect of recycled concrete aggregate properties on the bond strength between RCA concrete and steel reinforcement”, Cement and Concrete Research, Volume 41, Issue 10, October 2011, Pages 1037-1049 (2011).
- [14] Qiong Liu, Jianzhuang Xiao, Zhihui Sun: “Experimental study on the failure mechanism of recycled concrete”, Cement and Concrete Research, Volume 41, Issue 10, October 2011, Pages 1050-1057 (2011).

- [15] Wonchang Choi, Hyun-Do Yun, Sun-Woo Kim: "Flexural performance of reinforced recycled aggregate concrete beams" (c. 2009).
- [16] Sami W. Tabsh, Akmal S. Abdelfatah: "Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete", *Construction and Building Materials*, Volume 23, Issue 2, February 2009, Pages 1163-1167 (2008).
- [17] C. Thomas, J. Setièna, J.A. Polanco, P. Alaejos, M. Sánchez de Juan, *Durability of recycled aggregate concrete*, *Construction and Building Materials* 40 (2013) 1054–1065
- [18] R.K. Dhir, K.A. Paine, J. de Brito, M. Etxeberria, N.Y. Ho, C.S. Poon, V.W.Y. Tam: "Use of recycled and secondary aggregates in concrete: an overview (2011).
- [19] Marco Gomes, Jorge de Brito: "Structural concrete with incorporation of coarse recycled concrete and ceramic aggregates: durability performance" (2008).
- [20] Shi-CongKou, Chi-SunPoon, M. Etxeberria. "Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size Distribution of concrete". *Cement and Concrete Composites* 33 (2011) 286-291.
- [21] AkashRao, KumarN.Jha, SudhirMisra. "Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete" *Resource, Conservation and Recycling* 50 (2007) 71-81.
- [22] José M.V.Gómez-Soberón. "Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concret aggregate. An experimental study". *Cement and Concrete Research* 32 (2002) 1301-1311.
- [23] S.C Kou, C.S Poon, DixonChan, "Influence of fly ash a cement addition o the hardened properties of recycled aggregate concrete", *MaterStruct* (2008) 41:1191-1201.
- [24] WaiHoe Khan, M. Ramli, KennJ.Kan, M ZailanSuliman. "Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties". *Construction and Building Materials* 26 (2012) 565-573.
- [25] F.T. Olorunsago, N.Padayaoche. "Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes". *Cement and Concrete Research* 32 (2002) 179-185.
- [26] M.L.Berndt, "Properties of sustainable concrete containing fly ash, slag and recycled concrete aggregate", *Construction Building Materials* 23 (2009) 2606-2613.
- [27] Claudio Javier Zega, Angel Antonio Di Maio, "Recycled concrete made with different natural coarse aggregates exposed to high temperature", *Construction Building Materials*, 23 (2009) 2047-2052.
- [28] Gokce A, Nagataki S, Saeki T, Hisada M.: Freezing and thawing resistance of air-entrained concrete incorporating recycled coarse aggregate: The role of air content in demolished concrete. *Cement Concrete Recycl* 2002;37:23-37.
- [29] Fraaij A L A, Pietersen. H S. De Vireos, J. "Performance of concrete with recycled aggregates". *Sustainable Concrete Construction*. Eds. RK Dhir. T D Dyer and Halliday J., Thomas Telford, 2002, pp 187-198.
- [30] KwokKaiYuen, Dixon. "Durability Properties of Recycled Aggregate Concrete". Department of Civil and Structural Engineering. International Community for Composites Engineering. July 2-8 2000, Denver, Colorado.

- [31] A.Domingo-Cabo, C. Lázaro, F. López, M.A. Serrano-López. "Creep and shrinkage of recycled aggregate concrete". *Construction and Building Materials* 23 (2009) 2545-2553.
- [32] S.C.Kou, C.S.Poon. "Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate". *Construction and Building Materials* 35 (2012) 69-72.
- [33] A.Abbas, G.Fathifazl, O.B.Isgor, A.G.Razaqpur, "Durability of recycled aggregate concrete designed with equivalent mortar volum method" *Special Issue of the Journal of cement and Concrete Composite on Sustainability of Civil Engineering Structures- Durability of Concrete*.
- [34] JianchuangXiao, Wengui li, Yuhui Fan, Xiao Huang. "An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996-2011)". *Construction and Building Materials* 31 (2012) 364-383.
- [35] AkashRao, KumarN.Jha, SudhirMisra. "Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete" *Resources, Conservation and Recycling* 50 (2007) 71-81.
- [36] Kikuchi, K., Yasunaga, A. and Ehara, K., "The total evaluation of recycled aggregate and recycled concrete", *Proceedings of 3rd Int. RILEM Symp. Demolition and Reuse of Concrete & Masonry*, Odense, Denmark (E & FN Spon, London, Oct. 1993) 367-377.
- [37] Acker, Van A., "Recycling of concrete at a precast concrete plant: Part 1", *FIP notes* (1997/3) 3-6.
- [38] M.C.Limbachiya, T.Leelawatand R.K.Dhir: "Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete".
- [39] Andrzej Ajdukiewicz, Alina Kliszczewicz: "Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HSC" (2002).
- [40] Shi C. Kou, Chi S. Poon and Dixon Chan, "PROPERTIES OF STEAM CURED RECYCLED AGGREGATE FLY ASH CONCRETE". *Department of Civil and Structural Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom, Kowloon, Hong Kong. Abstract ID Number : 200.*
- [41] Residuos de construcción y demolición. <http://www.cedexmateriales.vsf.es> – Ficha técnica 3.1 de Diciembre de 2011 "Cenizas volantes de carbón y cenizas de hogar o escorias". Pág. 3.
- [42] O. I. Molina Bas, A. Moragues Terrades y J. C. Gálvez Ruiz: "LA INFLUENCIA DE LAS CENIZAS VOLANTES COMO SUSTITUTO PARCIAL DEL CEMENTO PÓRTLAND EN LA DURABILIDAD DEL HORMIGÓN: PROPIEDADES FÍSICAS, DIFUSIÓN DEL IÓN CLORURO Y DEL DIÓXIDO DE CARBONO". *Anales de Mecánica de la Fractura* 25, Vol. 2 (2008).
- [43] C.-S. Poon, S. C. Kou and D. Chan. "Influence of steam curing on hardened properties of recycled aggregate concrete". *Magazine of Concrete Research*, 2006, 58, No. 5, June, 289–299.
- [44] Ming-fang Ba, Chun-xiang Qian, Xin-jun Guo c, Xiang-yang Han. "Effects of steam curing on strength and porous structure of concrete with low water/binder ratio". *Construction and Building Materials* 25 (2011) 123-128.
- [45] Shi-Cong Koua, Chi-Sun Poon, Long-term mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete prepared with the incorporation of fly ash, *Cement & Concrete Composites* 37 (2013) 12–19.

- [46] Baoju Liu, Youjun Xie, Jian Li; "Influence of steam curing on the compressive strength of concrete containing supplementary cementing materials". *Cement and Concrete Research* 35 (2005) 994–998.
- [47] Selcuk Tqrkela, Volkan Alabas; "The effect of excessive steam curing on Portland composite cement concrete". *Cement and Concrete Research* 35 (2005) 405– 411.
- [48] Jongsung Sim, Cheolwoo Park. "Compressive strength and resistance to chloride ion penetration and carbonation of recycled aggregate concrete with varying amount of fly ash and fine recycled aggregate". *Waste Management* 31 (2011) 2352-2360.
- [49] ADIF (Administrador de Infraestructuras Ferroviarias). Entidad estatal que gestiona las infraestructuras (vías, estaciones y señalización entre otros) cobrando un canon a las empresas usuarias de la red.
- [50] F. D. Lydon, R. V. Balendran, Some observations on elastic properties of plain concrete. *Cement and Concrete Research*, 16 (3) (1986) 314-24.
- [51] N. Fonseca, J. de Brito, L. Evangelista. "The influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete made with recycled concrete waste". *Cement & Concrete Composites*. 12 April 2011.
- [52] C. Thomas, J. Setiéna, J.A. Polanco , P. Alaejos , M. Sánchez de Juan. "Durability of recycled aggregate concrete", *Construction and Building Materials* 40 (2013) 1054–1065
- [53] Qiang Zeng, Kefei Li, Teddy Fen-Chong, Patrick Dangla. "Analysis of pore structure, contact angle and pore entrapment of blended cement pastes from mercury porosimetry data", *Cement & Concrete Composites* (2012)